

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Universitaria

de

Ingeniería Técnica de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESARROLLO DE SISTEMA DE MEDIDA
DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA
TARJETA BEAGLEBOARD**

ALBERTO GARCÍA GUILLÉN

Julio de 2014



E.T.S.I.S. TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

TEMA: Optimización del consumo de terminales móviles multimedia

TÍTULO: Desarrollo de un Sistema de Medida del Consumo de Energía de la tarjeta BeagleBoard

AUTOR: Alberto García Guillén

TUTOR: Eduardo Juárez Martínez **Vº Bº.**

DEPARTAMENTO: SEC

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE:

VOCAL:

VOCAL SECRETARIO:

DIRECTOR:

Fecha de lectura:

Calificación: El Secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

En la actualidad existen cada vez más dispositivos móviles que utilizamos diariamente. Estos dispositivos usan las nuevas tecnologías inalámbricas, ya sean redes de telefonía, Wifi o Bluetooth, lo que conlleva un consumo de energía elevado. Estos dispositivos además tienen una limitación que es la capacidad de la batería. Dada esta problemática del alto consumo de energía el mundo de la electrónica de consumo se ve obligado a desarrollar aplicaciones y sistemas operativos que realicen un consumo de potencia más eficientes, baterías de otro tipo de composiciones, etc. Para lo que es necesario que exista una forma eficaz de medir el consumo de energía.

Con estas motivaciones se ha diseñado una tarjeta capaz de medir la potencia consumida por la BeagleBoard usando un método de medida novedoso. Los resultados obtenidos validan el diseño y el presupuesto total de la fabricación ha sido inferior a diez euros.

Por lo tanto, los objetivos se han cumplido fabricando una tarjeta caracterizada por su sencillez y su bajo coste, además de abrir la puerta a que, junto con un trabajo futuro, se consiga que la BeagleBoard sea capaz de conocer el consumo de potencia en tiempo real.

Agradecimientos.

En primer lugar quiero agradecerle a mi tutor Eduardo toda la ayuda prestada a lo largo de estos meses, tanto en las cuestiones técnicas del proyecto como en cuestiones personales de mi vida laboral. También le agradezco el último esfuerzo para conseguir presentar en las fechas previstas.

También quiero mencionar a los compañeros del GDEM que también me han ayudado cada vez que me surgía un problema.

Por supuesto, quiero agradecerle a mi familia que no tiraran la toalla conmigo, siempre apoyándome aunque yo tuviera un mal día y lo pagara con ellos, también empujándome a esforzarme cuando estaba más distraído.

A María, que en este tramo final ha sido mi cable a tierra y siempre ha estado ahí para ayudarme, y las veces que no podía ayudarme me hacía sonreír.

A todos los amigos que he hecho a lo largo de estos años en la escuela, que han hecho que estos años sean de los mejores de mi vida. El 2M, los VIPs, los cagones, los de la franja, todos sois los mejores.

A mis amigos de Arganda, Víctor, Panero, Álvaro, Santi, Juan, Márquez, Méndez y Ángel, os agradezco el poder compartir la vida con vosotros, celebrar los éxitos y ayudarnos en los fracasos.

Resumen.

En la actualidad existen cada vez más dispositivos móviles que utilizamos diariamente. Estos dispositivos usan las nuevas tecnologías inalámbricas, ya sean redes de telefonía, Wifi o Bluetooth, lo que conlleva un consumo de energía elevado. Estos dispositivos además tienen una limitación que es la capacidad de la batería. Un ejemplo claro son los smartphones, los usamos a diario y la batería dura un día o poco más.

Dada esta problemática del alto consumo de energía el mundo de la electrónica de consumo se ve obligado a desarrollar aplicaciones y sistemas operativos que realicen un consumo de potencia más eficientes, baterías de otro tipo de composiciones, etc. Para lo que es necesario que exista una forma eficaz de medir el consumo de energía.

En la actualidad, en el laboratorio del GDEM (Grupo de Diseño Electrónico y Microelectrónico) existen varias corrientes de acción a la hora de resolver o paliar esta problemática. Aquí podemos dividirlo en dos grupos: trabajos que se dediquen a conseguir que el sistema realice un consumo más eficiente de la energía y trabajos dedicados a realizar medidas más precisas de este consumo para que, a su vez, sean utilizadas por el propio sistema para decidir formas de actuar.

Con estas motivaciones se ha diseñado una tarjeta capaz de medir la potencia consumida por la BeagleBoard usando un método de medida novedoso. Los resultados obtenidos validan el diseño y el presupuesto total de la fabricación ha sido inferior a diez euros.

Por lo tanto, los objetivos se han cumplido fabricando una tarjeta caracterizada por su sencillez y su bajo coste, además de abrir la puerta a que, junto con un trabajo futuro, se consiga que la BeagleBoard sea capaz de conocer el consumo de potencia en tiempo real.

Abstract.

At present, the number of mobile devices that we use normally are increasing. These devices use the new wireless technologies, whether telephone network, wireless or Bluetooth, which carries a large power consumption. These devices also have a limitation which is the battery capacity. One clear example is the smartphones, we use them daily and the battery is spent in a day.

With this problem of high energy consumption the world of consumer electronics is forced to develop applications and operating systems with more efficient power consumption or a battery of other compositions. For that purpose it is necessary to have an effective way to measure energy consumption.

In the GDEM (Microelectronic and Electronic Design Group) lab there are several streams of action for solving or alleviating this problem. Here we can divide into two groups: jobs that are dedicated to getting the system that performs more efficient consumption of energy and works dedicated to doing more precise measures of this consumption.

With these motivations we designed a board which was able to measure the power consumed by the BeagleBoard using an innovative measurement method. The results validate the design and the price of the board is less than 10 euros.

Therefore, the goals have been accomplished by making a board which is characterized by its simplicity and low cost. It has also opened the door to, in a future work, the BeagleBoard being able to know the power consumption in real time by adding the necessary software.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción.	14
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.	16
2.1 Medida convencional de la potencia consumida por un circuito o sistema. .	18
2.2 PowerPack	21
2.3 Quanto.....	23
2.4 iCount.	26
2.5 Modelo elegido. Ventajas e inconvenientes.	29
Capítulo 3. Descripción del entorno.	30
3.1 BeagleBoard.	32
3.1.1 Hardware de la BeagleBoard.	33
3.1.2 Software de la BeagleBoard.	35
3.2 BeagleJuice.....	36
3.3 Emulador de batería.	39
Capítulo 4. Diseño y montaje de la placa de circuito impreso.	41
4.1 Análisis de la señal obtenida en la bobina de la BeagleJuice.	43
4.2 Estudio de qué circuitos usar para poder manejar esa señal obtenida.	45
4.3 Esquema del circuito elegido.	47
4.4 Simulación del circuito en Schematics (Orcad).	48
4.5 Montaje de un prototipo del circuito.	51
4.6 Diseño de la placa de circuito impreso.	52
4.7 Proceso de fabricación.	54
4.8 Resultado final.	56
Capítulo 5. Pruebas realizadas.	57
5.1 Validación del prototipo.	59
5.2 Primeras pruebas con la caja de resistencias.	61
5.3 Pruebas con resistencias de valores entre 500 y 100k Ohmnios.	63
5.4 Pruebas con la BeagleBoard.....	65
5.5 Descubrimiento de dos modos de funcionamiento.	68
5.6 Método usado para determinar cual es el umbral de esos modos de funcionamiento.	70
5.6.1 Primera combinación (10 - 25 Ohmnios).....	71
5.6.2 Segunda combinación (20 - 35 Ohmnios).	72
5.6.3 Tercera combinación (30 - 45 Ohmnios).....	73
5.6.4 Cuarta combinación (40 - 55 Ohmnios).	74

5.7 Resultados finales.	75
Capítulo 6. Conclusiones.	77
Capítulo 7. Trabajos futuros.	79
7.1 Añadir conectividad SPI.	81
7.2 Usar la propia BeagleBoard para manejar esos resultados obtenidos con nuestra placa.	83
Bibliografía.	86
Anexos.	89
ANEXO A. Cara Bottom de la placa de circuito impreso.	90
ANEXO B. Cara Top de la placa de circuito impreso.	90
ANEXO C. Presupuesto.	91
ANEXO D. Tablas de resultados.	92

Índice de figuras.

Figura 2.1.1. Medida de corriente con amperímetro.	18
Figura 2.1.2. Diagrama de cómo realizar la medida con multímetro y resistencia.	19
Figura 2.1.3. Medida de la corriente con multímetro y resistencia.	19
Figura 2.2.1. Esquema de la implementación de PowerPack.	22
Figura 2.2.2. Diagrama de estados de PowerPack.	22
Figura 2.3.1. Ejemplo de aplicación de Quanto.	25
Figura 2.4.1. Ejemplo de regulador conmutado.	26
Figura 2.4.2. Curvas características en el convertidor conmutado.	27
Figura 2.4.3. Relación entre la frecuencia y la corriente en el convertidor conmutado.	27
Figura 2.4.4. Esquema de la implementación de iCount.	28
Figura 3.1.1. La tarjeta BeagleBoard.	32
Figura 3.1.2. Diagrama de bloques de la BeagleBoard.	34
Figura 3.1.3. Posición de los interfaces e integrados en la BeagleBoard.	34
Figura 3.2.1. Imagen de la BeagleJuice.	37
Figura 3.2.2. Esquemático del regulador conmutado en la BeagleJuice.	38
Figura 3.3.1. Pantalla principal del emulador de batería.	39
Figura 3.3.2. Gráfica de evolución temporal DLOG.	40
Figura 3.3.3. Gráfica de ocurrencia de corriente CCDF.	40
Figura 4.1.1. Posición de la bobina en la BeagleJuice.	43
Figura 4.1.2. Conexión de un cable a la bobina de la BeagleJuice.	43
Figura 4.1.3. Esquema de la medida con osciloscopio.	44
Figura 4.1.4. Señal en la bobina capturada con osciloscopio.	44
Figura 4.2.1. Ejemplo de circuito detector de envolvente.	45
Figura 4.2.2. Ejemplo de circuito comparador con histéresis.	46
Figura 4.3.1. Esquema completo del circuito propuesto.	47
Figura 4.4.1. Circuito completo simulado en Pspice.	48
Figura 4.4.2. Comparación de señales de entrada simulada (izquierda) y real (derecha).	48
Figura 4.4.3. Forma de onda a la salida del circuito detector de envolvente en la simulación.	49
Figura 4.4.4. Forma de onda a la salida del comparador con histéresis en la simulación.	49
Figura 4.4.5. Resultado de la simulación.	50
Figura 4.5.1. Esquema del circuito real.	51
Figura 4.5.2. Prototipo del circuito.	51
Figura 4.6.1. Esquema del circuito en la herramienta Eagle.	52
Figura 4.6.2. Diseño de la placa de circuito impreso.	53
Figura 4.7.1. Insoladora utilizada para la fabricación de la PCB.	54
Figura 4.7.2. Puesto del laboratorio con los recipientes y las soluciones químicas para el revelado y atacado.	54
Figura 4.7.3. Proceso de atacado.	55
Figura 4.7.4. Resultado del atacado.	55

Figura 4.8.1. Placa de circuito impreso diseñada.	56
Figura 5.1.1. Esquema de la medida realizada.	59
Figura 5.1.2. Señal de entrada del circuito	59
Figura 5.1.3. Salida del circuito detector de envoltente.	60
Figura 5.1.4. Salida del comparador con histéresis.	60
Figura 5.2.1. Medidas con caja de resistencias.	61
Figura 5.2.2. Relación entre la corriente y la frecuencia en pruebas con caja de resistencias.	62
Figura 5.2.3. Señal de salida de la PCB con caja de resistencias.	62
Figura 5.3.1. Medida realizada con potenciómetro de 100k.	63
Figura 5.3.2. Relación entre corriente y frecuencia en pruebas con potenciómetro de 100k.	63
Figura 5.3.3. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 100k.	64
Figura 5.4.1. Esquema de la prueba con BeagleBoard.	65
Figura 5.4.2. Imagen tomada en el laboratorio de las medidas con la BeagleBoard.	65
Figura 5.4.3. Detalle de la colocación de la sonda.	66
Figura 5.4.4. Señal de salida de la PCB en prueba con la BeagleBoard.	66
Figura 5.4.5. Medida con amperímetro de la corriente consumida por la BeagleBoard.	67
Figura 5.5.1. Potenciómetro de 15 Ohmnios utilizado.	68
Figura 5.5.2. Señal a la salida de la PCB con resistencia equivalente a la BeagleBoard.	68
Figura 5.5.3. Relación entre el Ciclo de Trabajo y la corriente en pruebas con potenciómetro de 15 Ohmnios	69
Figura 5.6.1. Resistencias de potencia utilizadas.	70
Figura 5.6.2. Esquema de la medida realizada en este apartado.	70
Figura 5.6.3. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmnios + resistencia de 10 Ohmnios.	71
Figura 5.6.4. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmnios + resistencia de 10 Ohmnios.	71
Figura 5.6.5. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmnios + 2 resistencias de 10 Ohmnios.	72
Figura 5.6.6. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmnios + resistencia de 10 Ohmnios + resistencia de 22 Ohmnios.	73
Figura 5.6.7. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmnios + 2 resistencias de 10 Ohmnios + resistencia de 22 Ohmnios.	74
Figura 7.1.1. Tarjeta ADC PccMute.	81

Índice de tablas.

Tabla 2.3.1. Corrientes especificadas para cada uno de los componentes de la implementación.	24
Tabla 3.1.1. Características e interfaces de la BeagleBoard	33
Tabla 5.2.1. Medidas realizadas con caja de resistencias.	61
Tabla 5.3.1. Valores de las medidas realizadas con potenciómetro de 100k.	63
Tabla 5.5.1. Valores de las pruebas realizadas con potenciómetro de 15 Ohmios.	69

Capítulo1. Introducción.

Este proyecto parte del trabajo realizado por Jaime Herrera Martí en su PFC "Desarrollo de un emulador de baterías para el estudio del consumo de la tarjeta BeagleBoard". Se pretende mejorar la medida del consumo de la batería BeagleJuice por parte de la tarjeta BeagleBoard mediante un método obtenido de la lectura de una serie de artículos de investigación que mencionaremos más adelante.

El objetivo entonces será la fabricación de una placa de circuito impreso que sea capaz de medir la potencia consumida.

Para ello se seguirán los siguientes pasos:

1. Estudio de diferentes métodos de medidas de potencia y elección de uno de ellos.
2. Descripción del entorno de que se dispone y estudio de si el método puede aplicarse en este entorno.
3. Proceso de diseño y fabricación de la placa.
4. Realización de pruebas para la validación del funcionamiento de la placa construida.
5. Reflexión sobre el trabajo realizado y conclusiones.
6. Planteamiento de futuros trabajos.

A lo largo de los siguientes capítulos detallaremos cada uno de estos pasos.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos.

En este apartado se mostrarán los fundamentos teóricos que sirvieron de punto de partida para llevar a cabo este proyecto. Se realizó un estudio previo de las diferentes formas que existen en la actualidad para hacer estudios de consumo de energía en sistemas electrónicos, sean del tipo que sean.

Se comenzará enseñando el método más común para medir el consumo de potencia, método que se aprende y usa en asignaturas y laboratorios a lo largo del recorrido académico en la escuela .

Después se mencionarán los siguientes artículos:

- *"PowerPack: Energy Profiling and Analysis of High-Performance Systems and Applications"*: Trata sobre la herramienta PowerPack usada para conocer la curva de consumo de energía de un sistema usado como ejemplo.
- *"Quanto: Tracking Energy in Networked Embedded Systems"*: Trata de la herramienta Quanto usada en el artículo para, entre otras cosas, medir el consumo en cada componente del hardware de un sistema.
- *"Energy Metering for Free: Augmenting Switching Regulators for Real-Time Monitoring"*: Trata de un nuevo diseño de medida de la energía, llamado iCount.

Por lo tanto, en los siguientes apartados se realizará un estudio detallado de estos cuatro métodos: método convencional, PowerPack, Quanto e iCount.

Finalmente se decidirá cual de las opciones es la que se aplicará a nuestro sistema y se explicará el porqué de esta decisión.

2.1 Medida convencional de la potencia consumida por un circuito o sistema.

En este apartado se estudiará el método convencional de medida de potencia de un circuito y algunos ejemplos de aplicación de este método.

Una de las formas que se usan para conocer el valor de esa corriente consiste en realizar la medida con la ayuda de un amperímetro. Este amperímetro se colocará en serie para medir la corriente por ese hilo lo cual es equivalente a poner una resistencia lo más pequeña posible, a fin de que no se produzca una caída de tensión apreciable. Por lo tanto se obtiene una medida instantánea del consumo de corriente. En la figura 2.1.1 podemos ver un ejemplo de cómo haríamos esa medida en el laboratorio.

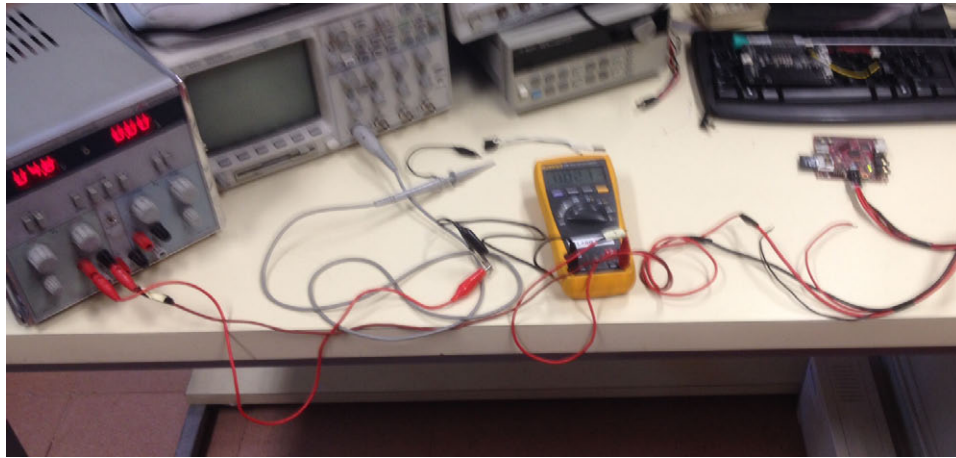


Figura 2.1.1. Medida de corriente con amperímetro.

Un segundo método consistiría en colocar una resistencia a modo de sonda y se realizaría una medida de la caída de tensión en esa resistencia. Con esa medida se aplica la Ley de Ohm y se obtiene el valor de la corriente. A modo de ejemplo se añaden a continuación las medidas realizadas en el artículo "Live, Runtime Power Measurements as a Foundation for Evaluating Power/Performance Tradeoffs" de la universidad de Princeton [1].

En la figura 2.1.2 se puede ver el diagrama de cómo se realiza la medida de la potencia consumida por su sistema.

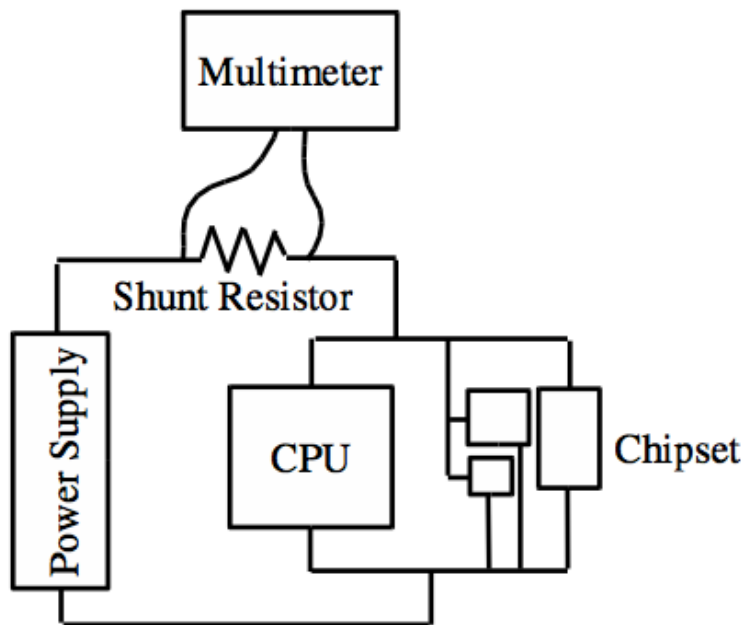


Figura 2.1.2. Diagrama de cómo realizar la medida con multímetro y resistencia.

También se muestra en la figura 2.1.3 la forma en la que se toman los datos en el laboratorio.



Figura 2.1.3. Medida de la corriente con multímetro y resistencia.

Como podemos ver en la figura 2.1.3 se utiliza un multímetro HP con el cual se pueden manejar los datos de dos diferentes maneras.

La primera, tal y como se observa en la foto, a través del display del multímetro se puede ver cual es la tensión en la resistencia, y, por lo tanto, con un cálculo rápido usando la Ley de Ohm, se obtendría cual es el valor de la corriente en la resistencia. En esta opción el resultado no se diferencia mucho del que se obtiene poniendo directamente un amperímetro en serie como se explicó en el primer método.

La segunda manera consiste en que se usa la posibilidad que nos ofrece el multímetro HP. Se puede conectar el multímetro a un ordenador, con el cual se podrá hacer un programa simple en LabView y, con la ayuda de este programa, se manejarán esos datos de la manera que sea necesaria en ese momento. Una gran utilidad, por ejemplo, para poder dibujar gráficas en función del tiempo del consumo que está teniendo el sistema en cuestión.

Esta forma de conocer el consumo se asemeja a la que usó el compañero Jaime Herrera Martí en su proyecto fin de carrera. En este caso se usa una fuente de alimentación para emular el comportamiento de la batería, esta fuente de alimentación está controlada por un ordenador, y al mismo tiempo que el ordenador indica la fuente el voltaje que debe configurar en su salida, la fuente le informa al ordenador de la corriente que está entregando. Con estos datos se pueden pintar gráficas que muestren el consumo en función del tiempo. Se estudiará con más detalle en el apartado 3.3 de esta memoria.

Con estos dos últimos métodos para conocer la potencia consumida estudiados se ofrece la ventaja de observar la curva de consumo en función de tiempo. Pero lo que quiere conseguir este proyecto y los trabajos que se realicen a continuación es que el sistema reciba la información de la potencia que está consumiendo en tiempo real.

2.2 PowerPack

En este apartado se procederá al estudio del artículo “PowerPack: Energy Profiling and Analysis of High-Performance Systems and Application” [2] obra de cinco miembros del IEEE.

A lo largo del artículo se describe como funciona PowerPack que fue la primera herramienta para medir el consumo de energía de dispositivos (por separado), incluyendo discos, memoria, tarjetas de red y procesadores en un clúster de alto rendimiento y correlacionar estas medidas con segmentos del código. Por lo tanto aquí aparece una de las ideas que se pretenden realizar en el laboratorio, medir consumo y relacionarlo con el código.

Casi toda la investigación de perfiles de energía existente hasta la creación de PowerPack se centraba en un único componente del sistema, tales como el procesador, el disco, la memoria o la interfaz de red. La estimación de los métodos que se utilizan incluyen la simulación, basada en el rendimiento perfil, y la medición directa. Aunque estas técnicas pueden proporcionar información útil se limitan a un solo componente de computación sin revelar el perfil de potencia de todo el sistema.

Consistente en una combinación de hardware (por ejemplo, sensores y medidores digitales) y software (por ejemplo, los drivers, las API de instrumentación y las herramientas de análisis) se consigue con esta herramienta tener el perfil de la potencia con la granularidad de componente y segmento de código. También se consigue hallar correlaciones entre las actividades del sistema o de la aplicación y el consumo de energía del sistema.

Por lo tanto las dos funcionalidades fundamentales de PowerPack son:

- Medidas precisas de potencia por componente del sistema.
- Sincronización automática entre la curva de consumo y los segmentos de código de la aplicación.

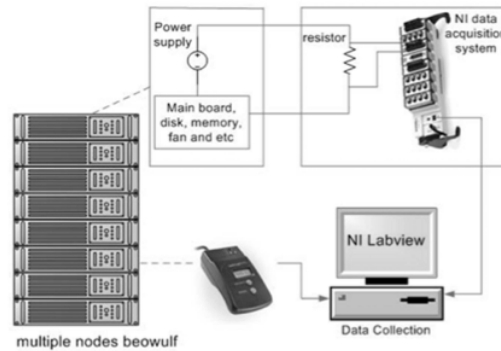


Figura 2.2.1. Esquema de la implementación de PowerPack.

Se soportarán tres tipos de sensores o medidores de potencia:

1. Sistemas adquirentes de datos de National Instruments que recogerán las medidas de los sensores resistivos.
2. Medidores de potencia Watt's Up Pro.
3. Fuentes de alimentación Advanced Configuration and Power Interface (ACPI).

En cuanto al software se tiene dos propósitos como antes hemos mencionado:

1. Grabación de las lecturas de datos de potencia de los diferentes sensores.
2. Sincronizar esas medidas con los segmentos de código que se están ejecutando.

En la figura 2.2.2 podemos ver un diagrama de estados en el que podemos ver como se realizarían estas dos tareas.

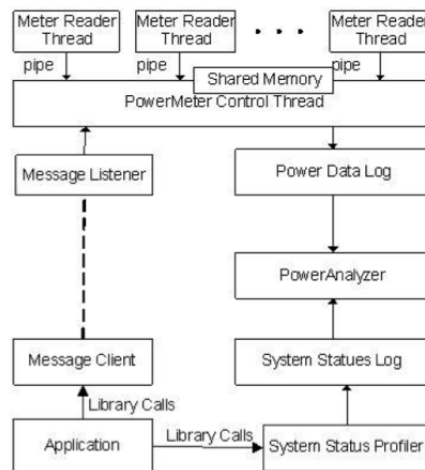


Figura 2.2.2. Diagrama de estados de PowerPack.

2.3 Quanto.

En el artículo “Quanto: Tracking Energy in Networked Embedded Systems” [3] de las Universidad de California y Stanford se describe el funcionamiento de la herramienta Quanto. En este apartado se trataran los puntos clave para hacerse una idea de cómo es ese funcionamiento y sus características.

Con esta herramienta se pueden mostrar los perfiles de consumo de energía en función del tiempo para los dispositivos embebidos de una red local. Combinando medidas rápidas de alta resolución de energía y con un seguimiento de las actividades del programa, se puede de mapear la energía consumida en los nodos de la red.

En el artículo se detallan los cuatro desafíos que superan:

1. Aprovechar un sensor de energía basado en un regulador conmutado sencillo para que un sistema operativo tome medidas de consumo de energía.
2. Realizar una regresión a posteriori con la que distinguir la curva de energía de componentes hardware individuales. Después el sistema operativo se encargará de juntar todos estos datos.
3. Describen un mecanismo simple de etiquetado por el cual conectan este uso de energía medido al código de alto nivel.
4. Extienden estas técnicas a todos los elementos de una red local.

Se aprovechará la oportunidad que ofrece el sistema operativo, en su implementación se utiliza TinyOS, ya que éste puede controlar los estados de potencia y los cambios de estos estados. Para poder hacer esto modifican los drivers de los dispositivos para poder interceptar estos cambios de estado.

Para tomar estas medidas de consumo por componente se usa una placa llamada HydroWatch. En la tabla 2.3.1 se pueden ver los datos de componentes con lo que ellos denominan “energy sinks” (las partes del componente que consumen energía), sus estados de consumo y la corriente nominal en esos estados, sacada de las hojas de características.

También usan iCount (un diseño diferente para medir la potencia que se detallará en el apartado siguiente) para medir la potencia total del sistema.

Energy Sink	Power State	Current
Microcontroller CPU	ACTIVE	500 μ A
	LPM0	75 μ A
	LPM1 ¹	75 μ A
	LPM2	17 μ A
	LPM3	2.6 μ A
	LPM4	0.2 μ A
	ON	500 μ A
	CONVERTING	800 μ A
	CONVERTING-2	50 μ A
	CONVERTING-5	200 μ A
	CONVERTING-7	700 μ A
	PROGRAM	3 mA
	ERASE	3 mA
	SAMPLE	60 μ A
Temperature Sensor	COMPARE	45 μ A
	ON	15 μ A
Radio	Regulator	OFF
	ON	1 μ A
	POWER_DOWN	22 μ A
	ENABLED	20 μ A
	IDLE	30 μ A
	Control Path	426 μ A
	Rx Data Path	19.7 mA
	Tx Data Path	17.4 mA
	TX (+0 dBm)	16.5 mA
	TX (-1 dBm)	15.2 mA
	TX (-3 dBm)	13.9 mA
	TX (-5 dBm)	12.5 mA
	TX (-7 dBm)	11.2 mA
	TX (-10 dBm)	9.9 mA
	TX (-15 dBm)	8.5 mA
Flash	POWER_DOWN	9 μ A
	STANDBY	25 μ A
	READ	7 mA
	WRITE	12 mA
	ERASE	12 mA
LED0 (Red)	ON	4.3 mA
LED1 (Green)	ON	3.7 mA
LED2 (Blue)	ON	1.7 mA

Tabla 2.3.1. Corrientes especificadas para cada uno de los componentes de la implementación.

Para la medida de consumo total del sistema se usa la herramienta iCount, herramienta que se explicará en detalle en el siguiente apartado de esta memoria.

En la parte software se usan tres mecanismos para manejar todos estos datos:

1. Una API que permite al programador crear etiquetas de cada aplicación.
2. Un conjunto de mecanismos para enviar esas etiquetas junto con las operaciones que componen la aplicación.
3. Un mecanismo para contar los recursos utilizados en la aplicación.

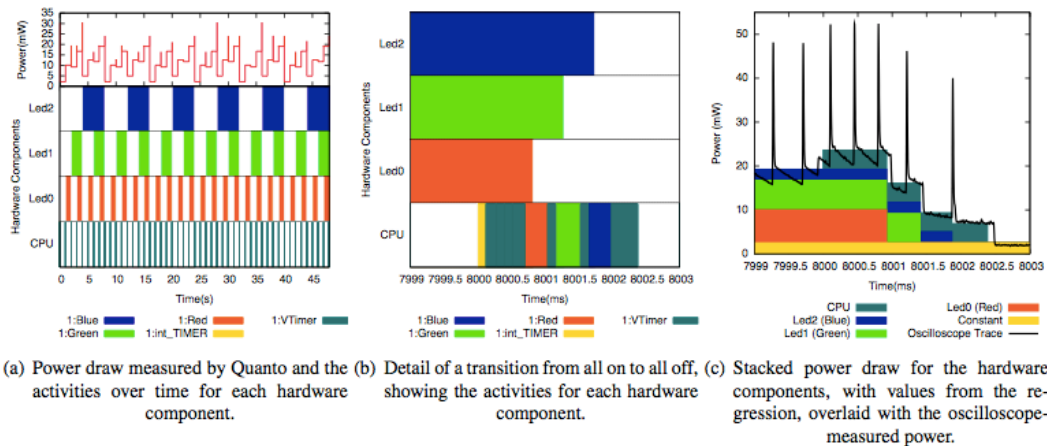


Figura 2.3.1. Ejemplo de aplicación de Quanto.

Por último, se muestra un resumen de uno de los ejemplos que se usan para calibrar y demostrar el funcionamiento de esta herramienta. La aplicación se compone de tres LEDs controlados por una CPU. Cada LED se usa como si fuera un bit, entonces en la figura 2.3.1a se puede observar como se realiza una cuenta de 0 a 8, siendo el LED rojo el bit de nivel más bajo y el LED azul el del nivel alto. En la parte inferior de esa misma gráfica se puede observar la actividad de la CPU y el timer de esta que controla la cuenta. La parte superior de la gráfica muestra el consumo de energía total, midiéndose gracias a la herramienta iCount.

Las figura 2.3.1b y 2.3.1c muestran el cambio de estado de ON a OFF de estos LEDs. En un primer momento se encuentran encendidos los tres LEDs y pasados unos milisegundos arranca la CPU y haciendo uso del timer va apagando uno a uno los LEDs. En la figura 2.3.1c se añade la curva (dibujada en color negro) de la potencia medida con un osciloscopio unida a un diagrama de bloques donde se puede distinguir que cantidad de consumo potencia total aporta cada componente.

2.4 iCount.

El último diseño de medida de energía que se estudiará en esta memoria es el que se nos detalla en el artículo "Energy Metering for Free: Augmenting Switching Regulators for Real-Time Monitoring" [4] de la Universidad de California y el MIT (Massachusetts Institute of Technology).

La idea principal es que en los sistemas que tienen un regulador conmutado o un convertidor conmutado integrado se puede conectar ese regulador a un microcontrolador que será capaz de tener medidas de energía en tiempo real. Esto es posible porque la relación entre la frecuencia de conmutación de estos reguladores y la corriente que entregan es lineal.

Por lo tanto, para implementar el diseño básico de iCount se requiere un regulador conmutado o convertidor conmutado y un microcontrolador con un contador externo.

Todo este diseño se basa en, como hemos comentado anteriormente, la relación entre la frecuencia de conmutación del regulador y la corriente que entrega a la salida es lineal. Esta relación es así dado que los pulsos en la bobina (que forma parte del circuito del regulador conmutado) se limitan a una corriente fija, el total de la energía en la bobina transferida desde la entrada a la salida también es fija, entonces, la frecuencia de conmutación varía linealmente con la potencia de salida (puesto que el voltaje de salida es constante, un aumento lineal de la corriente conlleva un aumento lineal de la potencia). Por lo tanto, simplemente con la conexión de la salida del regulador conmutado a un pin del microcontrolador, la energía total consumida en cualquier momento puede ser conocida y registrada.

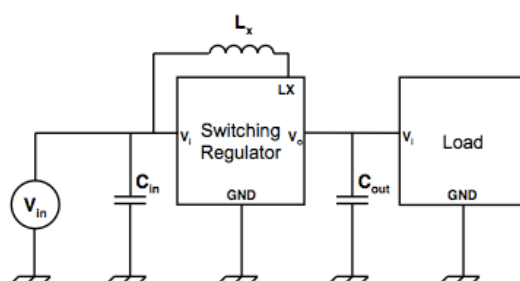


Figura 2.4.1. Ejemplo de regulador conmutado.

En la implementación de esta técnica que se realiza en el artículo se usa el convertidor DC-DC conmutado MAX1742. En el esquema de la figura 2.4.1 se puede visualizar como está configurado y las gráficas de funcionamiento se muestran en la figura 2.4.2.

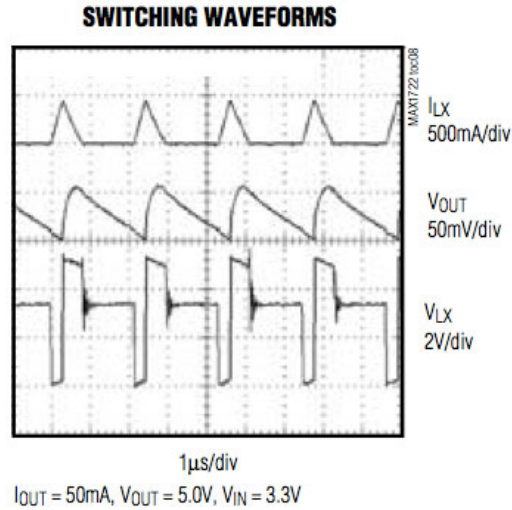


Figura 2.4.2. Curvas características en el convertidor conmutado.

Como se explicó anteriormente, estos convertidores conmutados como el del ejemplo, proporcionan un voltaje constante a su salida, lo cual implica que la relación entre la frecuencia de conmutación y la corriente de la carga sea lineal, como vemos en la figura 2.4.3. Esto también fija que la energía entregada por ciclo sea fija, por lo tanto simplemente si se cuentan estos ciclos se podrá hacer una aproximación del total de energía usado en un intervalo de cuenta, y, si se divide el número de cuenta entre el intervalo de tiempo en el que se ha estado realizando la cuenta se obtendrá el valor de potencia medio en ese intervalo.

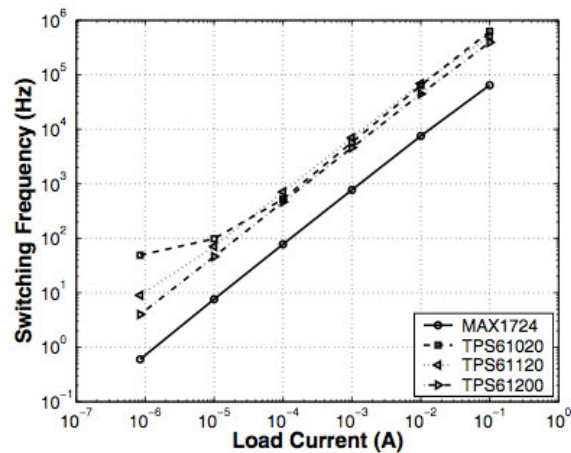


Figura 2.4.3. Relación entre la frecuencia y la corriente en el convertidor conmutado.

La solución que se aplica en el artículo consiste en realizar una monitorización de la tensión en la bobina (V_{Lx}). Por lo tanto se conectará la bobina a un microcontrolador, como podemos observar en la figura 2.4.4, para posteriormente con ayuda del microcontrolador se realice la cuenta esos pulsos calculándose así la frecuencia de conmutación y, por consiguiente, la corriente entregada a la salida del convertidor.

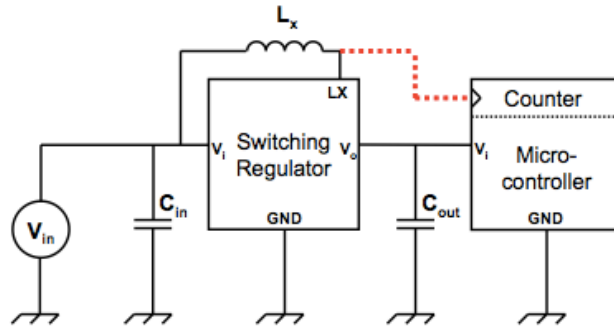


Figura 2.4.4. Esquema de la implementación de iCount.

Esta técnica se usaba, como hemos visto en el apartado anterior, en la implementación de Quanto para medir el consumo total de potencia de su sistema.

Como se ha visto en este apartado, este diseño se caracteriza por su sencillez. Se podrá usar este diseño e implementarlo en cualquier sistema que contenga un regulador conmutado o convertidor conmutado y, simplemente, con que se monitorice una señal y se calcule su frecuencia por medio de un contador externo, o incluso aprovechando contadores del propio microcontrolador, se obtendrá un control de la potencia consumida en vivo.

2.5 Modelo elegido. Ventajas e inconvenientes.

Puesto que, a lo largo de este capítulo, se han estudiado cuatro técnicas o herramientas para medir la corriente consumida por un sistema, se van a estudiar ahora sus ventajas e inconvenientes.

El modelo convencional, visto en el apartado 2.1, tiene como ventaja principal que la precisión de las medidas puede ser tan grande como te permitan los aparatos del laboratorio. Esto significa que cuánto más precisos sean los amperímetros o multímetros más precisión tendrás en la medida, aunque esto conlleva un coste en función de la calidad de estos instrumentos. Por lo tanto, se puede tener una gran precisión aunque para poder manejar esos datos se necesitará un ordenador ya que estos instrumentos, como las tarjetas de adquisición o los multímetros, suelen estar controlados con LabView. Se descarta esta opción porque un objetivo futuro será que el sistema pueda ser capaz de conocer su consumo sin ayuda de un ordenador u otros aparatos de instrumentación en el entorno.

En el apartado 2.2 se estudió la herramienta PowerPack, herramienta muy potente para sistemas grandes. La principal ventaja consiste en que se obtiene una correlación entre las medidas de potencia y el código, esto implica que tenemos que tener sensores y tarjetas de adquisición de datos, por lo tanto la complejidad y el coste monetario será grande. Esta implementación resulta compleja tanto en la parte hardware como en software. En cuanto al hardware, se tiene que disponer de una tarjeta de adquisición y un ordenador que la controle. Respecto al software, en el sistema operativo tendríamos que adaptar la aplicación puesto que esta se desarrolló para un sistema operativo diferente al nuestro.

Después se describió el funcionamiento de Quanto en el apartado 2.3. En esta herramienta se combinan dos métodos diferentes a los vistos anteriormente para medir la potencia. Uno de los métodos era por medio de la modificación de los drivers de los componentes del sistema se monitorizaban los estados de potencia de esos componentes. El otro método era iCount, que después se detallaría en profundidad, para medir el consumo total. La principal ventaja es el nivel de detalle que se obtiene con la correlación de las medidas y el código que se está ejecutando. La desventaja que se encuentra es la cantidad de trabajo que costaría la realización o modificación de estos drivers y la posterior correlación con el código.

Por último, se estudió el método iCount en el apartado 2.4. De este método se destacó como principal ventaja la sencillez de la implementación aunque una desventaja podría ser que la precisión no sea tan buena como la que se puede obtener de una tarjeta de adquisición. En los siguientes apartados se realizará un estudio para implementar este método en nuestro sistema.

Capítulo 3. Descripción del entorno.

En este capítulo se describirá como es el sistema que usamos en el laboratorio, la batería que alimenta a este sistema así como el emulador de batería desarrollado en un proyecto anterior.

Uno de los objetivos de los numerosos trabajos del laboratorio es estudiar el consumo de energía. En el laboratorio se usan diferentes tarjetas como la BeagleBoard o la PandaBoard. En nuestro caso usaremos la BeagleBoard. Por tanto en el siguiente apartado se detallará cómo es la BeagleBoard.

Después, se estudiará si es posible implementar el diseño de medida de corriente iCount, que se describió en el apartado 2.4. Para ello se describirá como es la batería BeagleJuice en detalle.

Por último, se describirá el emulador de batería diseñado por el compañero Jaime Herrera puesto que se hizo uso de él a la hora de agilizar algunas pruebas.

3.1 BeagleBoard.

La BeagleBoard es un ordenador de placa única, como la Raspberry Pi o Arduino, de bajo consumo y de software y hardware abierto producido por Texas Instruments en asociación con Digi-Key y Newark element14. La placa fue desarrollada por un pequeño equipo de ingenieros como una tarjeta educativa que pudiera ser utilizada en los colegios de todo el mundo para enseñar a las capacidades del hardware y el software de código abierto. En la figura 3.1.1 se puede ver el aspecto de la tarjeta.

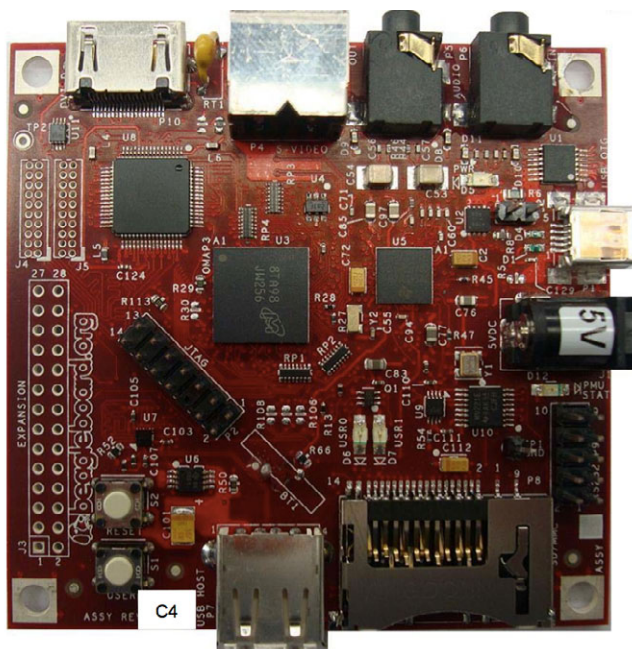


Figura 3.1.1. La tarjeta BeagleBoard.

A lo largo de este apartado se procederá a analizar las características y las oportunidades que proporciona este hardware. Todos los datos se obtuvieron del manual de referencia de la BeagleBoard [5] que se puede conseguir en su página beagleboard.org.

3.1.1 Hardware de la BeagleBoard.

El procesador montado en la BeagleBoard es el OMAP3530 de Texas Instruments[6]. Se ha equipado con un conjunto mínimo de características para que el usuario pueda experimentar el poder de la OMAP3530 aunque no pretende ser una plataforma de desarrollo completa ya que muchas de las características y las interfaces proporcionadas por el OMAP3530 no son accesibles desde el BeagleBoard. Mediante la utilización de interfaces estándar, la BeagleBoard se pueden ampliar sus capacidades. En la tabla 3.1.1 se detalla la lista de características del hardware así como las interfaces y conexiones que nos proporciona la BeagleBoard

	Feature	
Processor	OMAP3530DCBB72 720MHz	
POP Memory	Micron	
	2Gb NAND (256MB)	2Gb MDDR SDRAM (256MB)
PMIC TPS65950	Power Regulators	
	Audio CODEC	
	Reset	
	USB OTG PHY	
Debug Support	14-pin JTAG	GPIO Pins
	UART	LEDs
PCB	3.1" x 3.0" (78.74 x 76.2mm)	6 layers
Indicators	Power	2-User Controllable
	PMU	
HS USB 2.0 OTG Port	Mini AB USB connector	
	TPS65950 I/F	
	MiniAB	
HS USB Host Port	Single USB HS Port	Up to 500ma Power
Audio Connectors	3.5mm	3.5mm
	L+R out	L+R Stereo In
SD/MMC Connector	6 in 1 SD/MMC/SDIO	4/8 bit support, Dual voltage
User Interface	1-User defined button	Reset Button
Video	DVI-D	S-Video
Power Connector	USB Power	DC Power
	Power (5V & 1.8V)	UART
Expansion Connector (Not Populated)	McBSP	McSPI
	I2C	GPIO
	MMC	PWM
	Access to all of the LCD control signals plus I2C	3.3V, 5V, 1.8V

Tabla 2. Características e interfaces de la BeagleBoard

En la figura 3.1.2 se muestra el diagrama de bloques a alto nivel, donde se puede consultar como están interconectados los interfaces con el procesador OMAP3530.

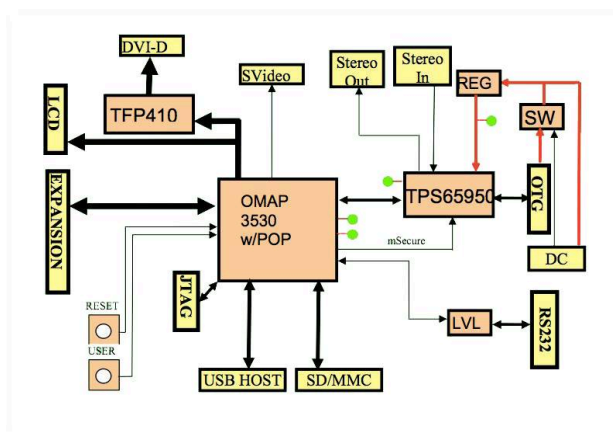


Figura 3.1.2. Diagrama de bloques de la BeagleBoard.

Por último, en la figura 3.1.3 se señala en la tarjeta BeagleBoard como están dispuestos los diferentes interfaces y circuitos integrados en la tarjeta.

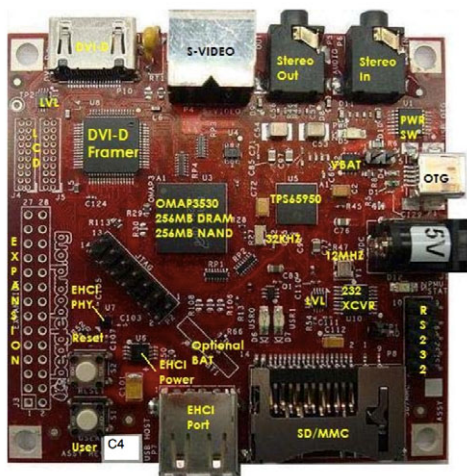


Figura 3.1.3. Posición de los interfaces e integrados en la BeagleBoard.

3.1.2 Software de la BeagleBoard.

El OMAP3530 soporta los siguientes sistemas operativos:

- Windows CE.
- Linux.
- QNX.
- Symbian.

Dentro de los Linux que soporta están las siguientes distribuciones: Angstrom, Debian, Ubuntu y Gentoo. Para arrancar la BeagleBoard el proceso es igual para cualquiera de las distribuciones, se grabaría en una SD el sistema elegido y conectando la SD a la BeagleBoard arrancaría y ya podríamos depurar nuestros programas por medio de la interfaz serie. En el laboratorio usamos la distribución Angstrom.

En la página beagleboard.org se puede consultar toda esta información, además de conseguir imágenes de software para instalar en una SD y encontrar tutoriales para realizar la instalación de software y el arranque.

Si no queremos tener la BeagleBoard conectada a un enchufe o a un ordenador para alimentarla Liquidware nos ofrece la opción de conectarle su BeagleJuice que es una batería para la BeagleBoard. En el siguiente apartado describiremos como es esta BeagleJuice.

3.2 BeagleJuice.

La BeagleJuice es un módulo de batería que proporciona una fuente de alimentación de 5V directamente a la BeagleBoard, que se puede montar sobre el lado trasero utilizando separadores, manteniendo así acceso fácil a los puertos de expansión.

La batería de Li-ion de 4500 mAh se carga mediante circuito de carga especializado que aumenta el rendimiento para aplicaciones de mayor duración. El propio módulo puede suministrar alimentación a través de un conector especial de barril de 2 pines, o directamente a través de cables de conectores macho duales. Se puede cargar a través de un B-puerto mini USB tipo, y un segundo puerto USB también está disponible para la carga acelerada.

Como la mayoría de los dispositivos de mano, portátiles, la BeagleJuice puede proporcionar energía mientras esté enchufada, y hay un interruptor de encendido/apagado para poder apagar la BeagleBoard sin tener que desconectar la BeagleJuice.

También se ofrece la oportunidad de desconectar la entrada de la batería y sustituirla por una fuente de alimentación. El motivo de esta acción es el poder emular el comportamiento de una batería, como hace Jaime Herrera en su proyecto. Este emulador se describirá en el siguiente apartado.

Las especificaciones técnicas son:

Carga de la batería: 4500 mAh

Tensión a la salida: 5 V

Corriente a la salida: 1.5 A

Alimenta una BeagleBoard durante al menos 6,5 horas

Botón de encendido/apagado

Carga simple o doble a través de puertos USB Tipo B-mini

LED de estado de carga de la batería

Conectores para proporcionar alimentación directa para cualquier aplicación

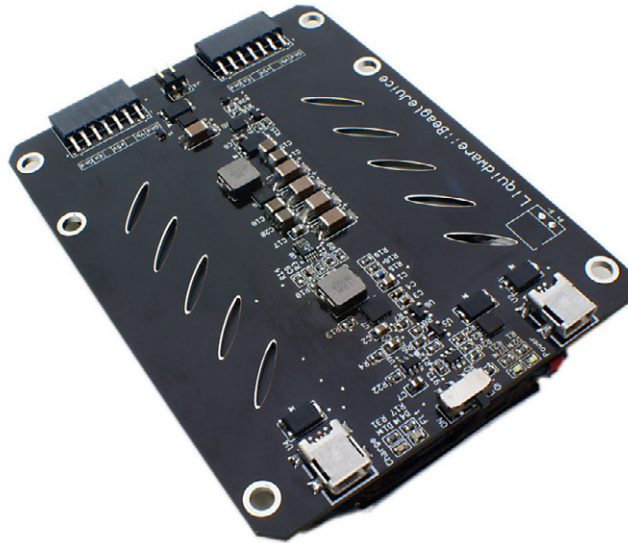


Figura 3.2.1. Imagen de la BeagleJuice.

En la figura 3.2.1 se puede ver como es físicamente la BeagleJuice donde se aprecian las características enumeradas antes, los conectores USB, el interruptor de encendido y los pines para conectar diferentes circuitos. La batería que se ha mencionado anteriormente se sitúa en la parte de debajo de la tarjeta.

Esta batería proporciona un voltaje que va de 3 a 4 Voltios por lo tanto necesitará tener un convertidor conmutado que pueda proporcionar los 5 Voltios a la salida para alimentar a la BeagleBoard.

Esto es una suposición, para poder comprobar la existencia de un convertidor conmutado se procede a contactar con Sarith Ong del laboratorio de Liquidware para que nos proporcionasen los esquemáticos del circuito de la BeagleJuice [7].

Como se relató en los apartados de teoría se necesita saber si existe un convertidor elevador para poder aplicar el diseño de iCount, visto en el apartado 2.4.

En la figura 3.2.2 se puede ver un fragmento de los esquemáticos del circuito, se ha centrado el enfoque en el regulador conmutado elevador. Se puede apreciar que es muy parecido al ejemplo se usó en el artículo de iCount y describimos en el punto 2.4 de esta memoria. La diferencia más grande es que en su sistema se usaba el regulador MAX1742 y en la BeagleJuice el LTC1871[8]. Por lo tanto, para nuestro circuito se monitorizará la forma de onda de la tensión en la bobina para aplicar el diseño de iCount.

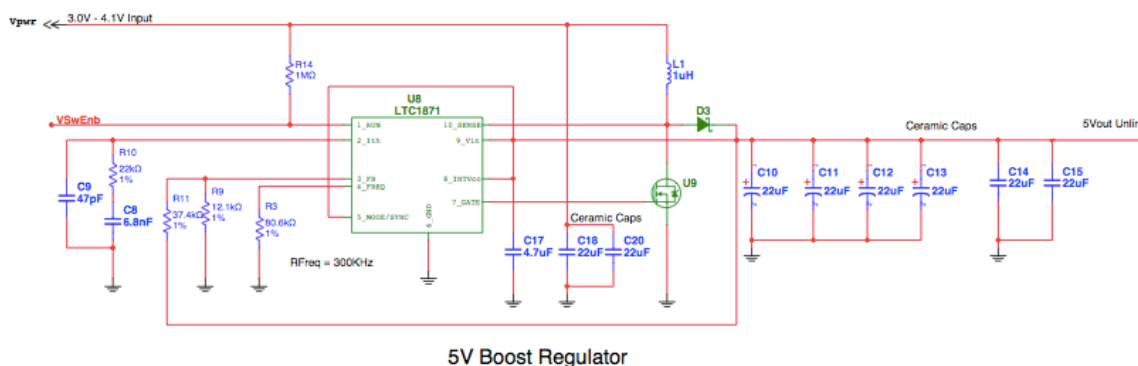


Figura 3.2.2. Esquemático del regulador conmutado en la BeagleJuice.

3.3 Emulador de batería.

El emulador de batería disponible en el laboratorio es el fruto del trabajo de Jaime Herrera Martí en su Proyecto Fin de Carrera “Desarrollo de un emulador de baterías para el estudio del consumo de la tarjeta BeagleBoard” [9].

La necesidad de tener un emulador de batería surge para evitar la constante carga y descarga de las baterías y así poder agilizar las pruebas. El emulador se compone de una fuente de alimentación programable conectado a un PC y a la BeagleJuice.

La fuente de alimentación programable que se utiliza es la 66321D de Agilent [10]. Esta fuente tiene dos características principales: la tensión, la corriente y la resistencia interna son programables por código y, además, tiene un voltímetro digital con el cual se podrán realizar medidas de tensión y corriente que visualizaremos en el ordenador.

La fuente se conectará al ordenador por medio de la interfaz GPIB y se programará por medio del programa Labview de National Instruments.

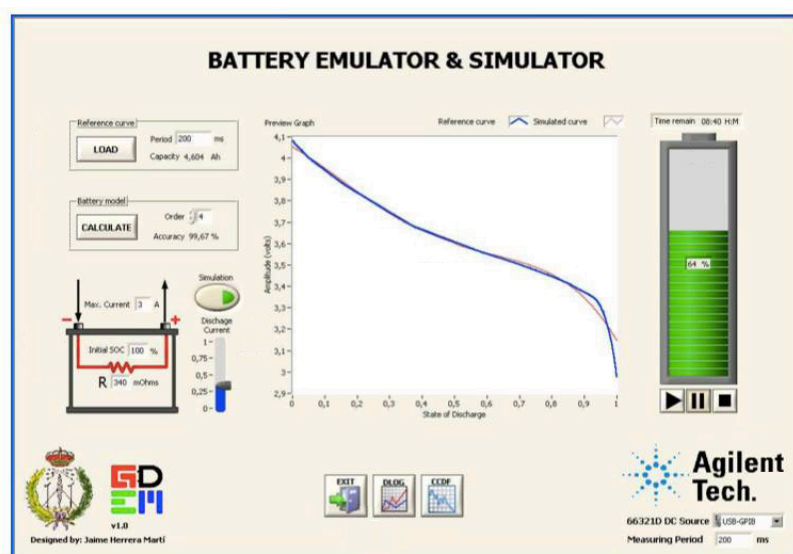


Figura 3.3.1. Pantalla principal del emulador de batería.

En la figura 3.3.1 se muestra la interfaz del programa de Labview. Este programa ofrece las siguientes posibilidades de configuración:

- Configurar periodo al que se muestrea la curva de referencia y cargar una. Introducir también el orden de polinomio de esa curva y poder calcular el modelo de la batería.

- Configurar también los parámetros de la batería (resistencia, estado inicial, corriente máxima). También se puede configurar si vamos a emular o simular la batería.
- También tiene controles para la emulación de play, pause y stop.

El programa también ofrece una previsualización de la forma de onda y una gráfica de estado de carga de la batería. Si se necesita una visión más detallada, tenemos la posibilidad de sacar dos gráficas: la gráfica de evolución temporal (DLOG), que podemos ver en la figura (), y la gráfica de ocurrencia de corrientes (CCDF), representada en la figura ().

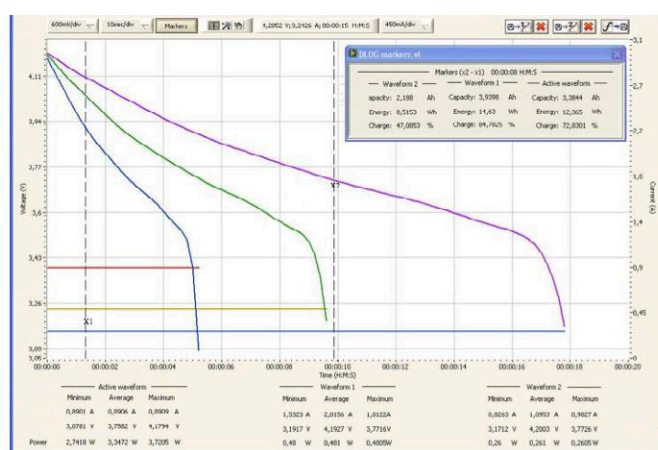


Figura 3.3.2. Gráfica de evolución temporal DLOG.

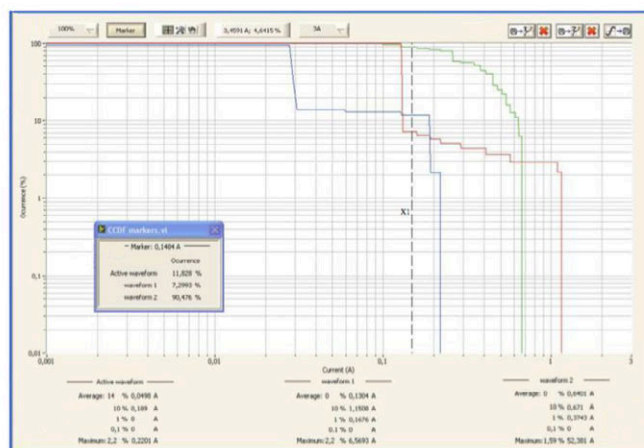


Figura 3.3.3. Gráfica de ocurrencia de corriente CCDF.

Capítulo 4. Diseño y montaje de la placa de circuito impreso.

Una vez se han descrito ya los fundamentos teóricos en los que se basa este proyecto y los elementos del entorno de trabajo que se disponen, se va a proceder a explicar como ha sido el proceso de diseño y montaje de la placa de circuito impreso que ha sido el resultado de este proyecto fin de carrera.

A lo largo de este capítulo se enumerarán los pasos seguidos para completar el proceso de implementación el diseño de iCount, descrito en el apartado 2.4, a las características de nuestro sistema.

Resumiendo los pasos a seguir serán:

- Evaluación de la forma de onda de la tensión en la bobina del regulador conmutado de la BeagleJuice.
- Estudio de si se puede tratar la señal directamente o, por el contrario, se necesita un tratamiento previo por medio de algún circuito.
- Simulación el circuito elegido y se evaluarán los resultados.
- Montaje del circuito en una placa de pruebas.
- Diseño de la placa de circuito impreso.
- Montaje de la placa de circuito impreso.

4.1 Análisis de la señal obtenida en la bobina de la BeagleJuice.

El primer paso será ver como de accesible es la BeagleJuice para tomar medidas en la bobina del convertidor conmutado. En apartados anteriores se localizó la posición de esta bobina en los esquemáticos y en la placa y, una vez determinada la posición, se podrá proceder a conocer como es la forma de onda por medio de un osciloscopio.

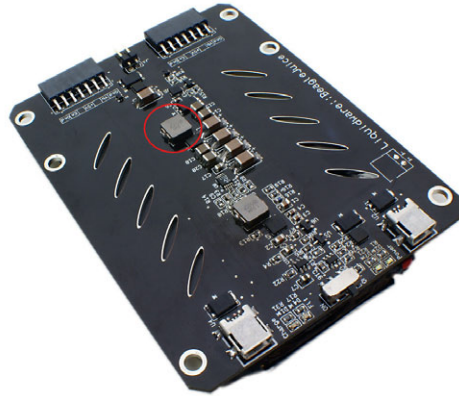


Figura 4.1.1. Posición de la bobina en la BeagleJuice.

La bobina está localizada en la posición que nos marca el círculo rojo en la figura 4.1.1. Por el encapsulado del componente resulta difícil conectar un cable aunque si se puede pinchar la sonda del osciloscopio. La única forma que se encuentra para poder conectar esa bobina sin tener que soldar un cable es doblarlo de forma que encaje entre el condensador y la bobina como podemos apreciar en la figura 4.1.2.

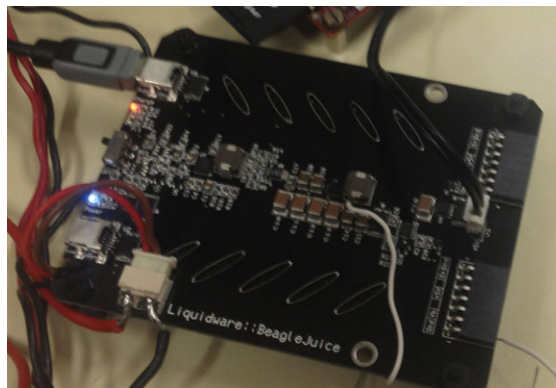


Figura 4.1.2. Conexión de un cable a la bobina de la BeagleJuice.

La captura de la forma de onda de la bobina se realizará conectando la BeagleBoard alimentándose de la BeagleJuice y colocaremos la sonda del osciloscopia en la pata de la bobina tal y como se muestra en la figura 4.1.3.

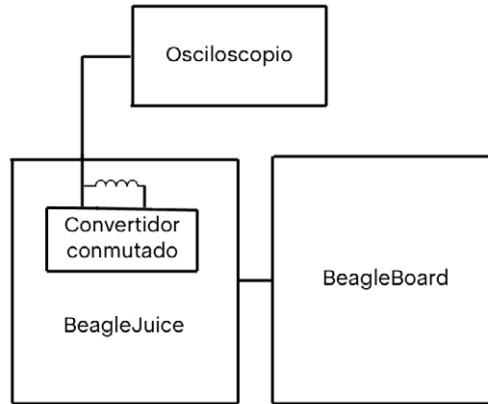


Figura 4.1.3. Esquema de la medida con osciloscopio.

La señal obtenida se puede ver en la figura 4.1.4. Esta onda tiene una serie de picos y amortiguaciones. Puesto que, siguiendo la línea de la implementación de iCount vista en el apartado 2.4, se pretende que un sistema digital como un contador o timer sea capaz de medir la frecuencia de esta señal, se necesitará que esta señal se parezca en la medida de lo posible a una señal cuadrada. Para ello en el siguiente apartado se estudiarán las opciones disponibles.

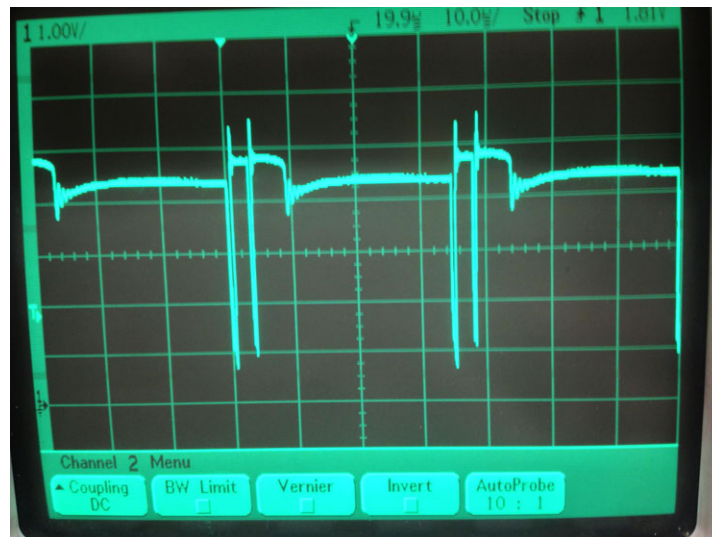


Figura 4.1.4. Señal en la bobina capturada con osciloscopio.

4.2 Estudio de qué circuitos usar para poder manejar esa señal obtenida.

Para tratar la forma de onda vista en el apartado anterior existen varias opciones: Usar filtros, rectificadores de señal, comparadores...

Entre todas las opciones se elige añadir una primera etapa con un circuito detector de envolvente. Un uso habitual de estos circuitos es para demodulación AM. Tomando por entrada una señal de alta frecuencia a la salida se obtiene la envolvente de esa señal. ¿Por qué se elige este circuito? Porque con un detector de envolvente se pueden eliminar esas amortiguaciones que hemos detectado, y obtener una señal que se parezca a un rizado para, en un paso posterior, poder convertir esta onda en cuadrada con la ayuda de un comparador.

Este circuito consta de tres elementos: un diodo, un condensador y una resistencia dispuestos en la forma de la figura 4.2.1. El condensador almacena carga cuando la señal crece y se descarga lentamente a través de la resistencia. La función del diodo es asegurar que la corriente no circule en sentido contrario. Al final un circuito detector de envolvente usa una rectificación de onda media y al final se usa un filtrado.

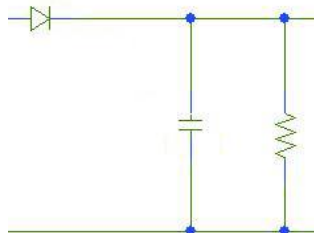


Figura 4.2.1. Ejemplo de circuito detector de envolvente.

Después se añadirá una etapa con un comparador con histéresis para obtener una señal lo más parecida a una onda cuadrada posible, que es el objetivo que se marcó en el apartado anterior.

El esquema del circuito sería como el de la figura 4.2.2. En la entrada positiva del comparador se conectará la señal de salida de nuestro circuito detector de envolvente. En la entrada negativa se utilizará tensión de referencia adecuada a los parámetros que estemos manejando. Esto es una tensión de referencia que esté dentro de los valores de la señal rizada que se obtendrá a la salida del detector de envolvente.

La salida del comparador será cero cuando el valor de la entrada positiva sea inferior al valor de la tensión de referencia y, por el contrario, será 5 Voltios cuando el valor de la entrada positiva sea superior al valor de la tensión de referencia.

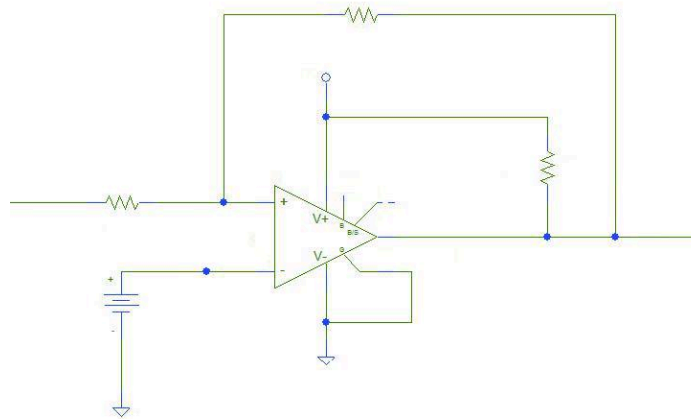


Figura 4.2.2. Ejemplo de circuito comparador con histéresis.

4.3 Esquema del circuito elegido.

En este apartado se detallará el resultado final de la propuesta de circuito y también los valores de los componentes elegidos para el montaje de éste.

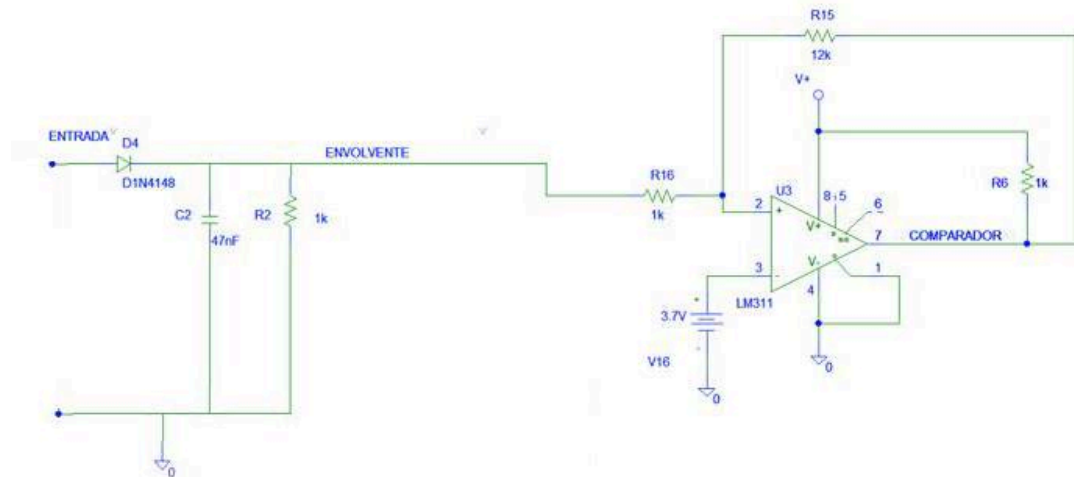


Figura 4.3.1. Esquema completo del circuito propuesto.

En la figura 4.3.1 se puede ver el esquema completo del circuito donde se diferencian las dos etapas: primero el circuito detector de envoltente y después el comparador con histéresis.

En el circuito detector de envoltente se elige el diodo 1N4148 al ser de los más típicos. En cuanto a la resistencia y condensador se calculan los valores de tal modo que la constante de tiempo nos resulta:

$$\tau = R * C = 1k\Omega * 47nF = 47\mu s$$

En cuanto al comparador con histéresis se elige que el valor de referencia para la comparación será 3 voltios por lo tanto el nivel nos quedaría de esta forma:

$$N = V_{ref} * \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 3V * \frac{12k + 1k}{12k} = 3,249V$$

La fuente de tensión puesta en la patilla de la tensión de referencia será sustituida en el futuro por un divisor de tensión con un potenciómetro para poder configurar bien esa tensión de referencia en el circuito real.

4.4 Simulación del circuito en Schematics (Orcad).

Al tener una señal tan compleja en la bobina resulta difícil simular el circuito. Pero con las herramientas del schematics de Orcad se puede generar una señal parecida a la entrada del circuito. Se necesitan usar generadores VPWL y switches para poder crear la señal. En la figura 4.4.1 se muestra el esquema completo del circuito usado para simularlo en Pspice.

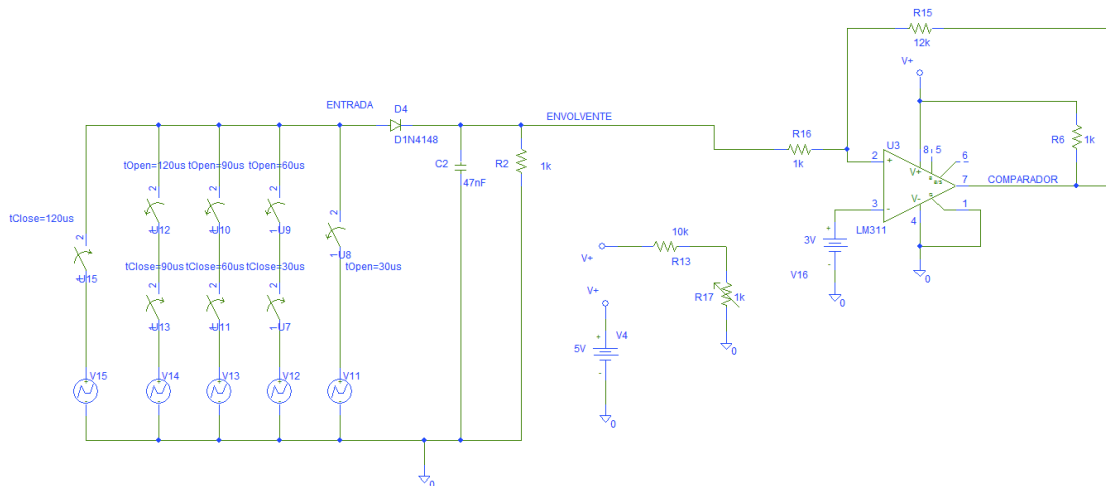


Figura 4.4.1. Circuito completo simulado en Pspice.

En la figura 4.4.2 se hace una comparación de la forma que tiene la señal que hemos simulado a la entrada. En la derecha se ha puesto la forma de onda en la bobina para recordar como era y ver que se ha logrado una aproximación aceptable.

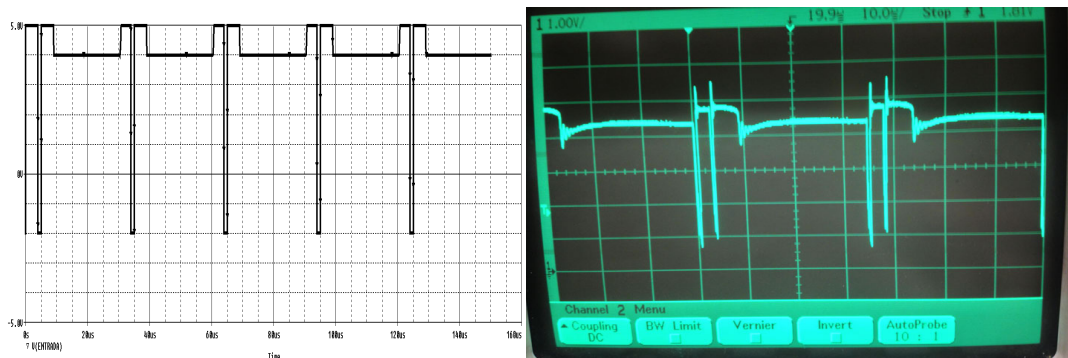


Figura 4.4.2. Comparación de señales de entrada simulada (izquierda) y real (derecha).

En la siguiente figura (4.4.3) se visualiza la forma de onda a la salida del circuito detector de envolvente. Como dijimos en el apartado anterior, cuando se elige el tipo de circuito a utilizar, a la salida del detector de envolvente se obtendrá una señal con un rizado. El valor de la tensión de referencia del comparador se tendrá que situar entre esos valores de rizado.

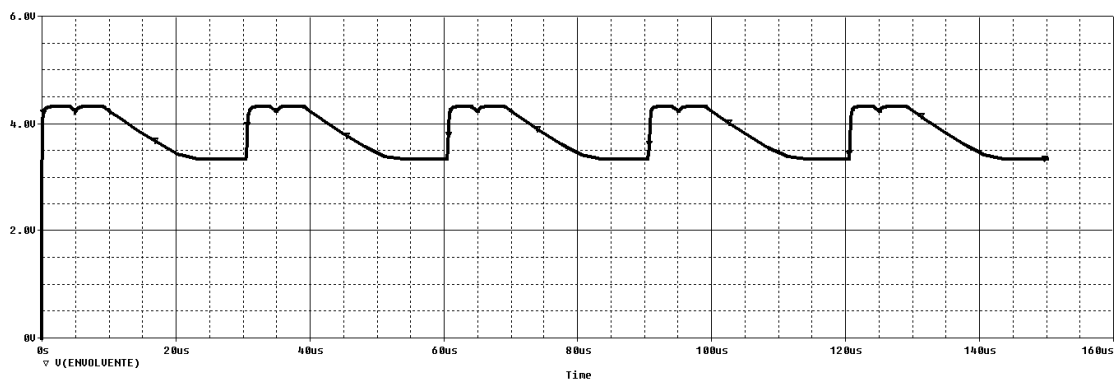


Figura 4.4.3. Forma de onda a la salida del circuito detector de envolvente en la simulación.

Después, en la figura 4.4.4 se muestra la forma de onda a la salida del comparador. Como se observa en la gráfica esta señal ya sería válida para poder medir su frecuencia con un sistema digital puesto que ya es casi una cuadrada perfecta y con los niveles de tensión aceptados.

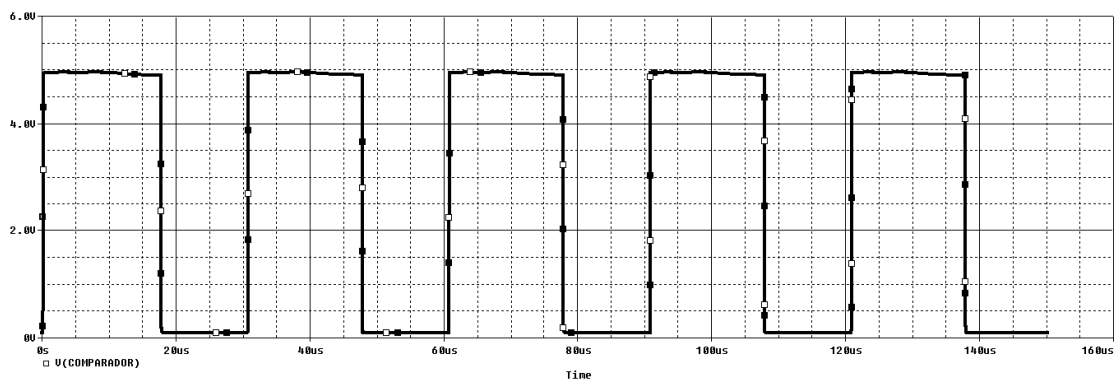


Figura 4.4.4. Forma de onda a la salida del comparador con histéresis en la simulación.

Diseño y montaje de la placa de circuito impreso.

Por último, en esta figura 4.4.5 se muestran las tres señales a la vez, resaltando más la señal de salida del circuito simulado.

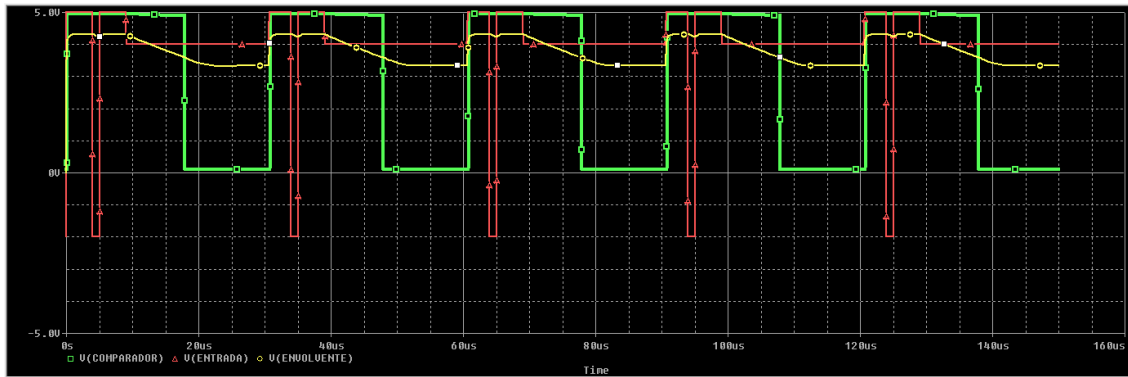


Figura 4.4.5. Resultado de la simulación.

4.5 Montaje de un prototipo del circuito.

Los resultados de las simulaciones indican que el circuito elegido funciona como se pensó desde un principio. Se consigue convertir la señal de la bobina del convertidor conmutado en una señal cuadrada, lo cual ayudará en un futuro a la manipulación de la señal en un sistema digital.

Se tomarán los valores de los componentes que se especifican en el esquema de la figura 4.5.1 para montar un prototipo del circuito en una placa de pinchos.

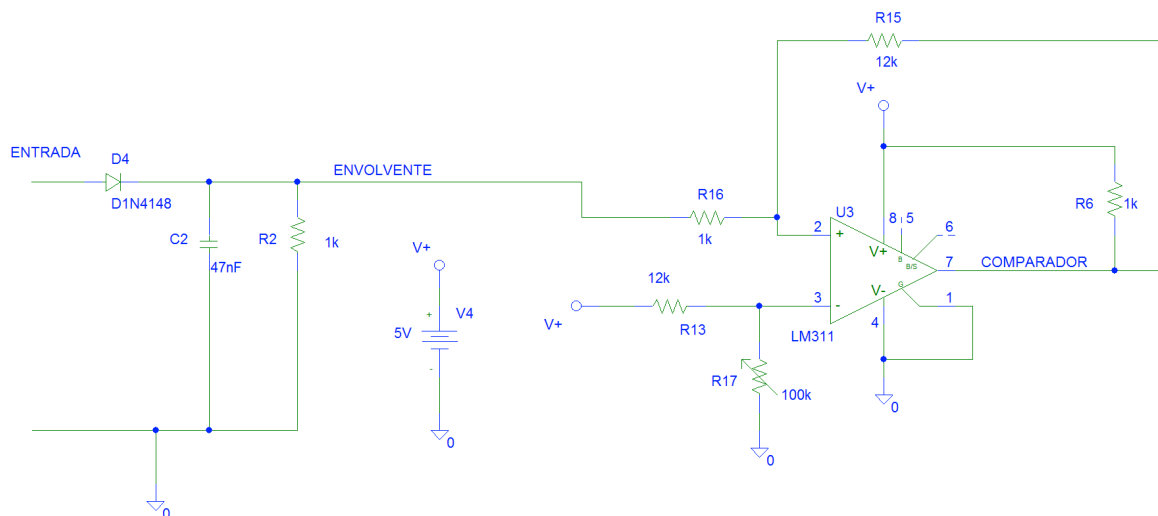


Figura 4.5.1. Esquema del circuito real.

En la figura 4.5.2 se puede observar este prototipo.

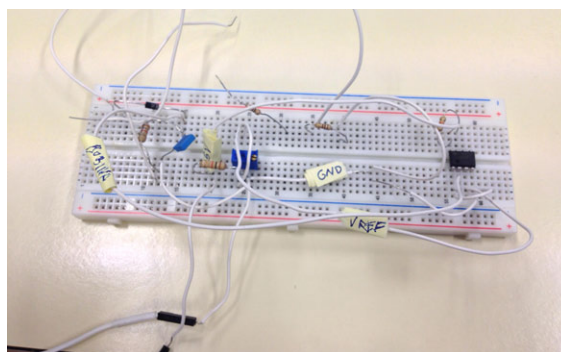


Figura 4.5.2. Prototipo del circuito.

Con este prototipo se propone verificar que las gráficas obtenidas en las simulaciones se corresponden con las medidas realizadas sobre este prototipo con un osciloscopio. Los resultados conseguidos con este prototipo se detallan en el próximo capítulo.

4.6 Diseño de la placa de circuito impreso.

Llegados a este punto se ha certificado, primero por medio de unas simulaciones y después con ayuda de un prototipo, que el circuito planteado en el apartado 4.3 cumple con los objetivos que se habían propuesto. Entonces, se procede a diseñar la placa de circuito impreso que contenga este circuito.

El diseño de la placa de circuito impreso se realizará con ayuda de la herramienta Eagle de CadSoft [11]. Se usa esta herramienta dado que es gratuita y tiene versión para el sistema operativo de Macintosh.

Como podemos observar en la figura 4.6.1, además de los elementos que se han enseñado en los anteriores esquemas y en la placa de pruebas, se han añadido a este diseño varios puntos de test para después facilitar la realización de las pruebas y también un par de conectores para las señales que utilizaremos.

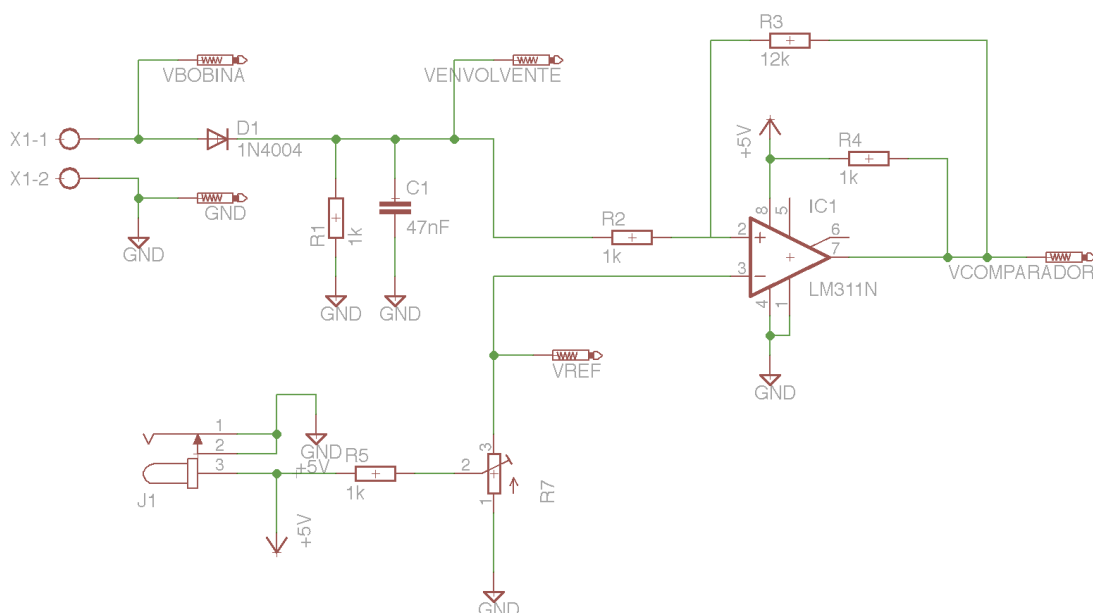


Figura 4.6.1. Esquema del circuito en la herramienta Eagle.

Diseño y montaje de la placa de circuito impreso.

Después del proceso de colocación y routado de la placa, se puede observar en la figura () como es el diseño final de la placa de circuito impreso.

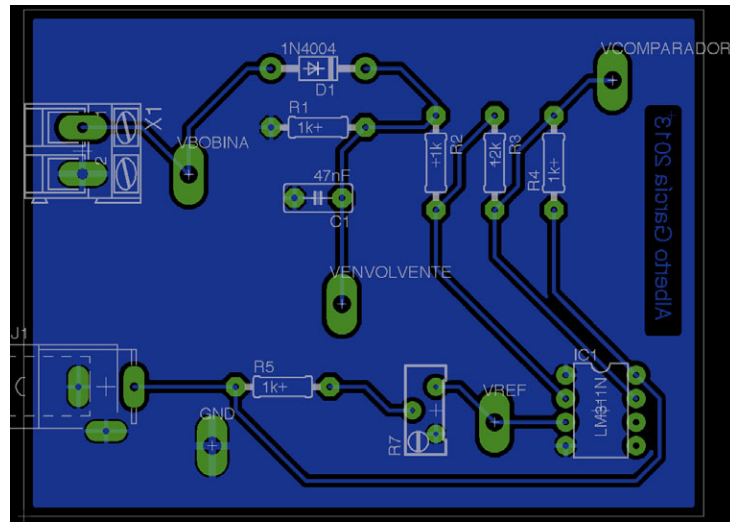


Figura 4.6.2. Diseño de la placa de circuito impreso.

En los anexos de esta memoria se podrán encontrar las huellas de la cara Top y Bottom de la placa para que en un futuro se puedan fabricar más.

También se adjunta en un anexo el presupuesto total que se ha necesitado para la fabricación de esta placa. El coste es muy pequeño debido a la pequeña cantidad de elementos necesarios para montar este circuito, lo cual es una ventaja grande frente al coste de las tarjetas de adquisición de datos por ejemplo, como vimos en el apartado 2.5 de esta memoria.

4.7 Proceso de fabricación.

Con el diseño ya rematado vamos a continuar con el proceso de fabricación de la placa de circuito impreso.

Para ello, el primer paso será imprimir las huellas (adjuntas en el anexo) en un acetato para poder insolarlas en la insoladora del laboratorio.



Figura 4.7.1. Insoladora utilizada para la fabricación de la PCB.

Una vez insolada la placa de cobre, se necesitará pasar por el proceso de revelado y posteriormente por el proceso de atacado para eliminar las zonas de cobre que no forman parte del circuito.

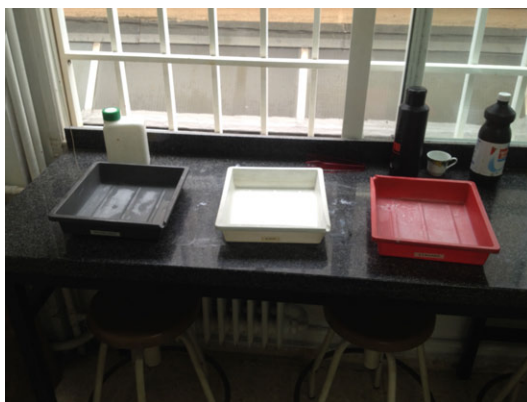


Figura 4.7.2. Puesto del laboratorio con los recipientes y las soluciones químicas para el revelado y atacado.

Diseño y montaje de la placa de circuito impreso.

Aquí en la figura 4.7.3 se muestra el proceso de atacado a la placa para eliminar todo el cobre sobrante.



Figura 4.7.3. Proceso de atacado.

Por último, se muestra en la figura 4.7.4 el resultado de todo este proceso ya preparado para ser taladrado y montado.

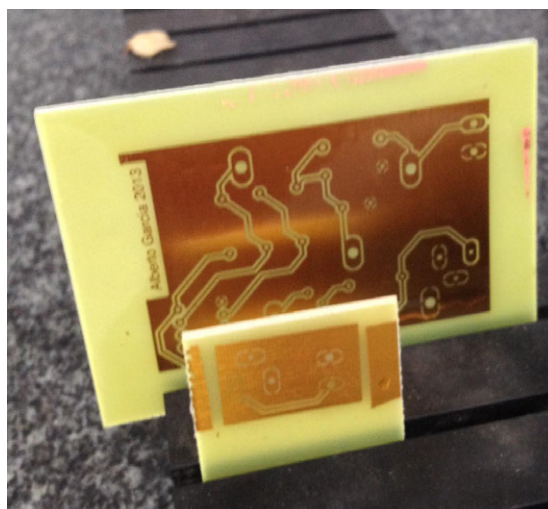


Figura 4.7.4. Resultado del atacado.

En el siguiente apartado se mostrará el resultado final, la placa taladrada con los componentes montados y preparada para validar el circuito con la serie de pruebas que se realizarán en el siguiente capítulo.

4.8 Resultado final.

El resultado final es el que se muestra en la figura 4.8.1 una vez taladrado y montados todos los componentes.



Figura 4.8.1. Placa de circuito impreso diseñada.

En el siguiente capítulo se describirán todas las pruebas realizadas sobre este diseño con el fin de demostrar que puede ser usado para medir el consumo de potencia utilizando el método de iCount (contado en el apartado 2.4). También se comentarán las primeras pruebas hechas para validar el prototipo de la placa de pinchos.

Capítulo 5. Pruebas realizadas.

Una vez se ha obtenido una tarjeta con la cual se puede estudiar el consumo de corriente se va a proceder a realizar una serie de medidas exhaustivas.

Con estas medidas se pretende verificar que los fundamentos teóricos que hemos visto en el punto 2.4 de esta memoria se cumplen. Por lo tanto, se espera que la relación entre la frecuencia de la forma de onda de la bobina del convertidor conmutado de la BeagleJuice y la corriente que entrega sea lineal.

Se seguirá el siguiente orden:

1. Validación del prototipo.
2. Primeras pruebas con la placa de circuito impreso y una caja de resistencias.
3. Pruebas con resistencias de valor entre 500 y 100k Ohmios.
4. Pruebas con la BeagleBoard.
5. Descubrimiento de dos modos de funcionamiento.
6. Determinación del umbral de los modos de funcionamiento.
7. Resultados finales.

5.1 Validación del prototipo.

En este apartado se procede a validar el prototipo creado con el diseño de nuestro circuito, tal y como se contó en el apartado 4.5 de esta memoria.

Se tomarán medidas en tres puntos: la señal a la entrada (tensión en la bobina de la BeagleJuice), la señal a la salida del circuito detector de envolvente y la señal que obtenemos a la salida del comparador. Estas medidas se realizarán con ayuda del osciloscopio del laboratorio, poniendo la sonda en cada punto del circuito y conectando a la salida de la BeagleJuice la BeagleBoard en reposo.

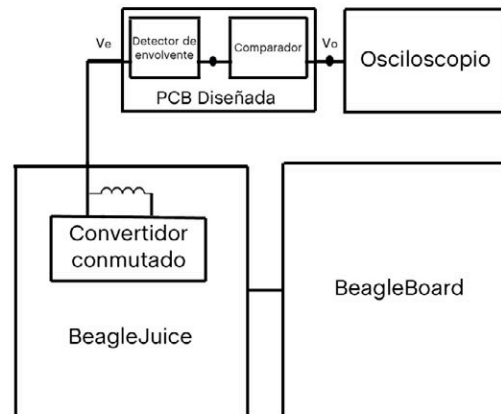


Figura 5.1.1. Esquema de la medida realizada.

Con este experimento se pretende obtener señales similares a las simuladas en el apartado 4.4.

Primero se visualiza la señal a la entrada del circuito, esta señal es la tensión en la bobina del convertidor conmutado de la BeagleJuice.

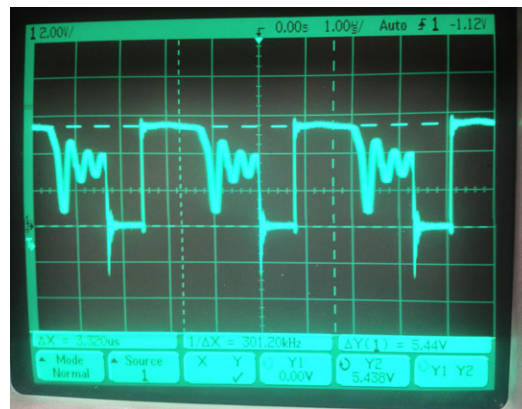


Figura 5.1.2. Señal de entrada del circuito

En la figura 5.1.2 se observa la señal una vez pasado el circuito detector de envolvente, donde vemos que se nos eliminan esos picos y los valores negativos de tensión. Se obtiene a la salida del circuito una onda con un rizado entre los 5 y los 3,5 voltios, tal y como se esperaba en el diseño y en la simulación.



Figura 5.1.3. Salida del circuito detector de envolvente.

Por último en la figura 5.1.3 se muestra la señal a la salida del comparador. Como se puede observar la señal no es perfectamente cuadrada pero nos sirve para poder medir la frecuencia de esta señal con la ayuda de algún sistema digital.

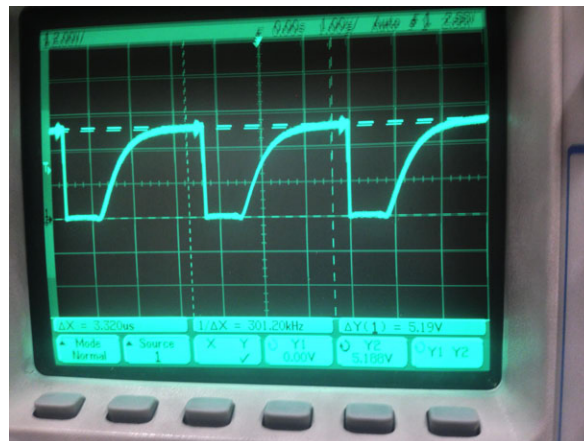


Figura 5.1.4. Salida del comparador con histéresis.

Por lo tanto con estos resultados se valida el diseño del circuito puesto que cumple con lo esperado desde un principio. Con la placa de circuito impreso montada procederemos a hacer más pruebas exhaustivas del funcionamiento.

5.2 Primeras pruebas con la caja de resistencias.

En un primer momento, mientras se estuvieron estudiando los diferentes artículos que después formarían la base teórica de este proyecto, se realizaron una serie de medidas con una caja de resistencias con un rango de valores de 10 a 400 Ohmios que es capaz de disipar una potencia de 500 miliWattios.

Para la realización de estas medidas se utilizó la siguiente configuración, tal y como se explica en la figura 5.2.1.

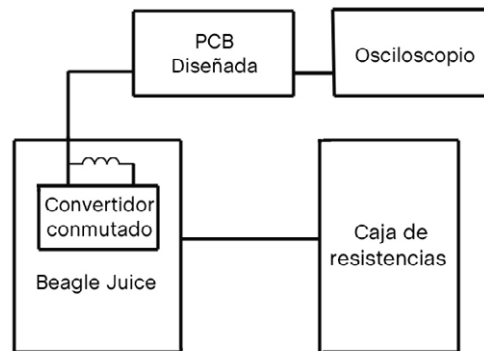


Figura 5.2.1. Medidas con caja de resistencias.

Por lo tanto, se podrán realizar medidas desde 60 Ohmios a 400. Se deja un margen de seguridad para no dañar la caja. En la tabla 5.2.1 se pueden consultar los valores obtenidos con nuestras medidas.

Voltage(V)	Resistor(Ohm)	Current(mA)	Frequency(kHZ)
5	60	83,3333	25,0000
5	70	71,4286	21,7390
5	80	62,5000	18,3820
5	90	55,5556	16,6670
5	100	50,0000	14,8810
5	120	41,6667	12,8210
5	140	35,7143	10,2880
5	160	31,2500	9,5785
5	180	27,7778	8,9928
5	200	25,0000	7,6687
5	250	20,0000	6,3939
5	300	16,6667	5,4348
5	350	14,2857	4,7619
5	400	12,5000	4,2918

Tabla 5.2.1. Medidas realizadas con caja de resistencias.

Como se puede observar en la figura 5.2.2 la relación entre la frecuencia y la corriente es lineal.

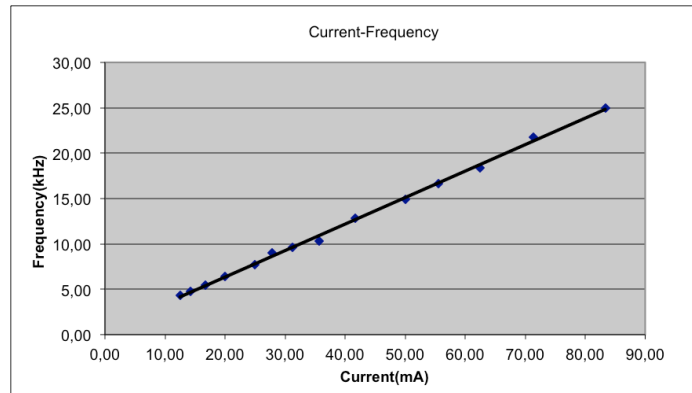


Figura 5.2.2. Relación entre la corriente y la frecuencia en pruebas con caja de resistencias.

Durante estas medidas en el osciloscopio se puede observar la salida de nuestra placa. En la figura 5.2.3 se muestra como es, se puede observar que no tenemos el mismo ejemplo que en el caso de la teoría, aquí medimos la frecuencia entre el tren de tres pulsos que se aprecia. Esa frecuencia aumenta en función de si el circuito está entregando más corriente.

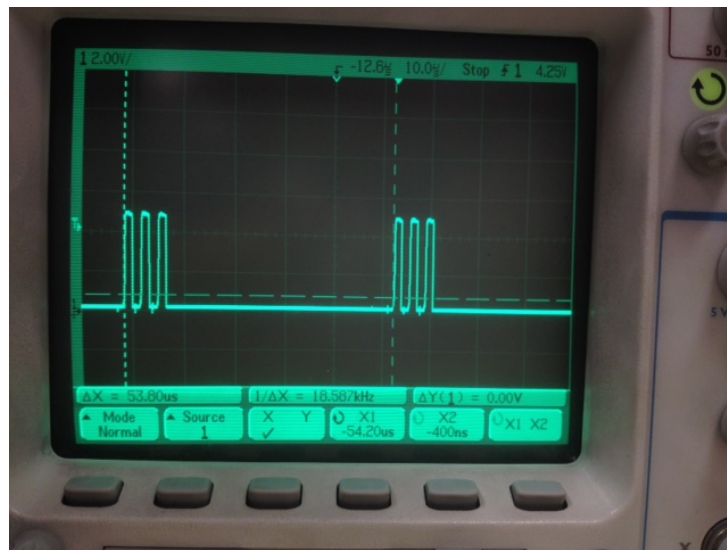


Figura 5.2.3. Señal de salida de la PCB con caja de resistencias.

5.3 Pruebas con resistencias de valores entre 500 y 100k Ohmios.

Para este intervalo de valores de resistencia se utilizará un potenciómetro de 100 kilo Ohmios. El esquema que se utilizó para realizar estas medidas es el de la figura 5.3.1.

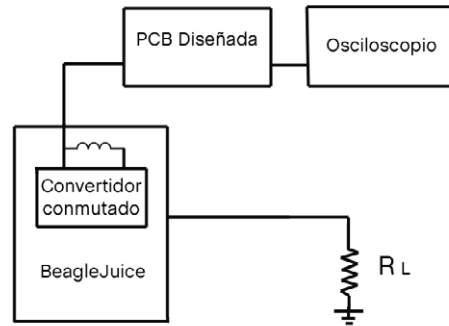


Figura 5.3.1. Medida realizada con potenciómetro de 100k.

En la tabla 5.3.1 se pueden consultar las medidas tomadas.

Voltage(V)	Resistor(Ohm)	Current(mA)	Frequency(kHZ)
5	1000	5,00	2,70
5	2400	2,08	1,35
5	4500	1,11	1,00
5	18000	0,28	0,70
5	97700	0,05	0,61

Tabla 5.3.1. Valores de las medidas realizadas con potenciómetro de 100k.

En la figura 5.3.2 se puede observar que en este intervalo de valores tomados se sigue manteniendo la linealidad entre frecuencia y corriente.

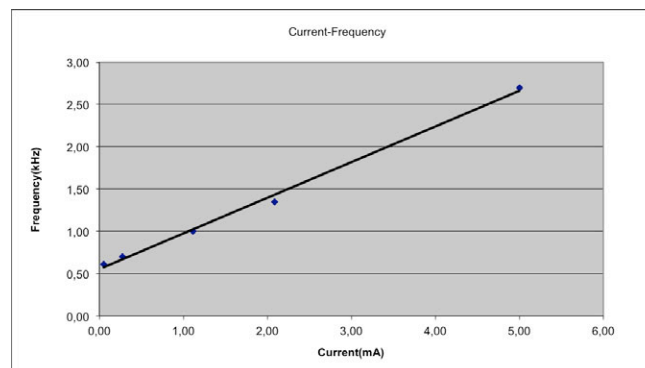


Figura 5.3.2. Relación entre corriente y frecuencia en pruebas con potenciómetro de 100k.

En la salida del osciloscopio esta vez se observa que el tren de pulsos no es de tres si no que hay dos pulsos esta vez y la medida de frecuencia se realiza de la misma manera. Se puede consultar en la figura 5.3.3.

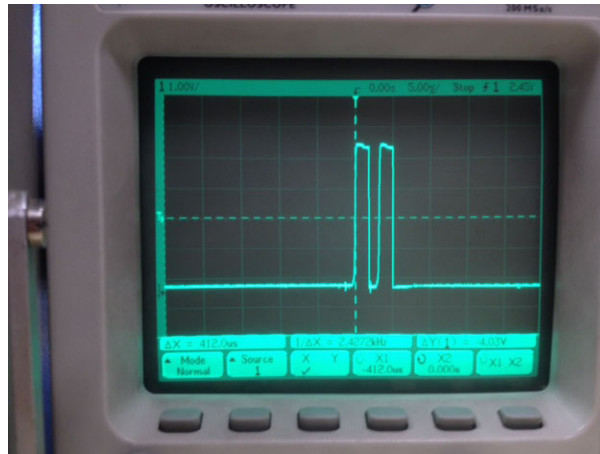


Figura 5.3.3. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 100k.

5.4 Pruebas con la BeagleBoard.

Llegados a este momento, se decide probar conectando a la salida de nuestra BeagleJuice una BeagleBoard en reposo para conocer la frecuencia y la forma de onda que tenemos en la salida de nuestra placa. El esquema de la medida se muestra en la figura 5.4.1.

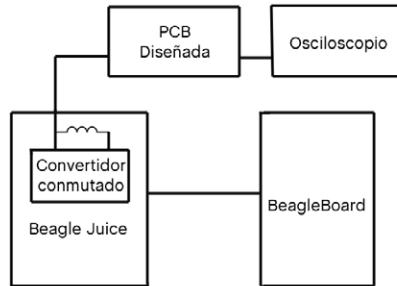


Figura 5.4.1. Esquema de la prueba con BeagleBoard.

En la figura 5.4.2 se muestra como se realizan estas medidas en el laboratorio. La BeagleBoard está conectada a la BeagleJuice y se puede apreciar como de la BeagleJuice sale un cable desde la bobina a la entrada de nuestro diseño. Se coloca la sonda del osciloscopio a la salida del circuito. Como ya se mostró en el punto 4.7 la placa está provista de varios puntos de test que nos permiten el fácil acceso para conocer la forma de onda en la bobina, la salida del circuito detector de envolvente, la tensión de referencia para el comparador y la salida de éste.

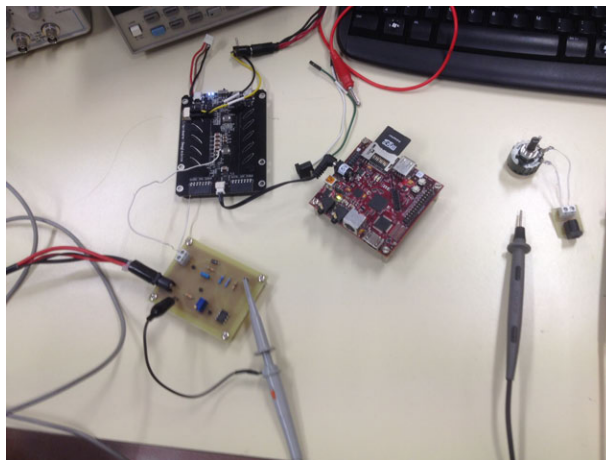


Figura 5.4.2. Imagen tomada en el laboratorio de las medidas con la BeagleBoard.

En la figura 5.4.3 se muestra como es la colocación de la sonda para realizar la medida en detalle.



Figura 5.4.3. Detalle de la colocación de la sonda.

En el osciloscopio se observa algo diferente a los casos anteriores. En este caso la señal no se compone de una serie de pulsos de los que midamos la frecuencia con la que estos se repiten. Como podemos ver en la figura 5.4.3, la señal que se ha medido con la BeagleBoard es una señal cuadrada continua con 300 kilo Herzios de frecuencia.

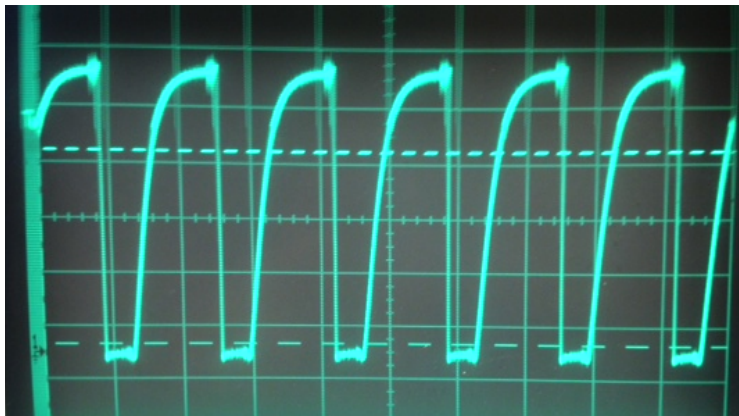


Figura 5.4.4. Señal de salida de la PCB en prueba con la BeagleBoard.

Puesto que el comportamiento del convertidor conmutado es diferente a lo visto en apartados anteriores, se procede a calcular cuánta corriente está consumiendo la BeagleBoard para después poder hacer pruebas con valores de resistencia equivalentes y poder determinar que está ocurriendo cuando el convertidor entrega esos valores de corriente.

Como se muestra en la figura 5.4.5, se procede a medir cual es la corriente que consume la BeagleBoard con ayuda de un amperímetro.



Figura 5.4.5. Medida con amperímetro de la corriente consumida por la BeagleBoard.

Se obtiene la medida de 0,4991 Amperios, con esta medida se calculará el valor de la resistencia equivalente sabiendo que la BeagleBoard se alimenta con 5 Voltios se aplica la Ley de Ohm:

$$V = R * I \rightarrow R = \frac{V}{I}$$

$$R_{eq} = \frac{5 V}{0,4991 A} = 10,018 \Omega \cong 10 \Omega$$

Con este resultado se procede a buscar un potenciómetro que entre su intervalo de valores contenga nuestro valor de resistencia equivalente y que, a su vez, sea capaz de soportar los 2,5 Watios de potencia.

5.5 Descubrimiento de dos modos de funcionamiento.

Una vez se ha obtenido el potenciómetro se realizarán pruebas para estudiar el comportamiento del regulador conmutado de la BeagleJuice cuando tiene que entregar valores de corriente cercanos a los 0,5 Amperios que consumía la BeagleBoard en reposo.

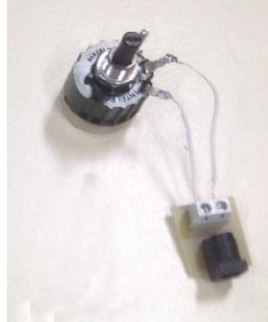


Figura 5.5.1. Potenciómetro de 15 Ohmios utilizado.

El potenciómetro es de 15 Ohmios de valor y potencia máxima soportada de 3,5 Watios. Por lo tanto, se realiza un cálculo con el cual se pueda saber el rango de valores en los que podremos movernos.

$$P = V * I \rightarrow I_{max} = \frac{P_{max}}{V} = \frac{3,5 W}{5 V} = 0,7 A$$

Entonces el valor de resistencia mínimo que se podrá probar con ese potenciómetro sin que se queme será de unos 7,2 Ohmios.

La primera prueba que se realiza es colocar el potenciómetro en el valor de la resistencia equivalente calculada en el punto anterior y conectarlo a la salida de la BeagleJuice. En el osciloscopio se observa una señal prácticamente idéntica a la que se apreció anteriormente, completamente cuadrada y de 300 kilo Herzios de frecuencia.



Figura 5.5.2. Señal a la salida de la PCB con resistencia equivalente a la BeagleBoard.

Llegados a este punto, se aprovechará la ventaja que nos ofrece el potenciómetro, esto es, se podrá variar el valor de la resistencia, y por tanto el de la corriente a la salida, simplemente girando el tornillo.

Cuando se realiza esta acción se visualiza en el osciloscopio una reacción inmediata, a medida que se modifica el valor de la resistencia la frecuencia medida no se modifica pero se observa que el ciclo de trabajo sí cambia.

Ante este descubrimiento se procede a realizar unas medidas con el objetivo de determinar si nos encontramos ante un comportamiento parecido al estudiado en los puntos anteriores en los que la frecuencia estaba directamente relacionada con la corriente, solo que en este rango de corrientes es el ciclo de trabajo el que está relacionado con la corriente.

Voltage(V)	Resistor(Ohm)	Current(mA)	Duty Cycle (%)
5	14,98	333,78	22,3
5	14,01	356,89	24,6
5	13,03	383,73	25,5
5	12,15	411,52	27,0
5	11,03	453,31	29,8
5	10,06	497,02	31,1
5	9,04	553,10	33,2
5	8,11	616,52	35,0
5	6,85	729,93	38,1
5	6,33	789,89	40,0

Tabla 3.5.1. Valores de las pruebas realizadas con potenciómetro de 15 Ohmios.

Se puede observar en la gráfica de la figura 5.5.3 que la relación es muy cercana a ser lineal.

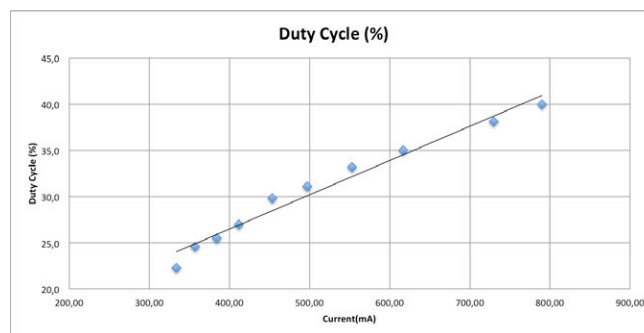


Figura 5.5.3. Relación entre el Ciclo de Trabajo y la corriente en pruebas con potenciómetro de 15 Ohmios

5.6 Método usado para determinar cual es el umbral de esos modos de funcionamiento.

Puesto que se han encontrado dos modos de funcionamiento en el convertidor conmutado se va a proceder a buscar la delimitación o el umbral de estos dos modos.

También hay que considerar que las corrientes siguen siendo grandes, por lo tanto, se hará uso de unas resistencias de potencia cedidas por el laboratorio de electrónica de potencia del departamento SEC de la escuela.

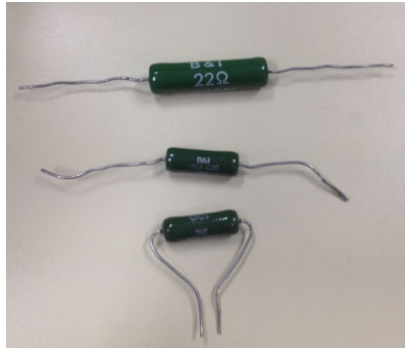


Figura 5.6.1. Resistencias de potencia utilizadas.

Con estos valores se pretende unir las medidas realizadas con la caja de resistencias con las del potenciómetro estudiadas en los puntos anteriores.

Como se puede apreciar en la figura 5.6.1 los valores usados son dos resistencias de 10 ohmios y una de 22 ohmios lo cual sumadas junto con el potenciómetro nos permite evaluar el intervalo de valores entre 15 ohmios y 60.

En los siguientes sub-apartados se estudiará las diferentes medidas realizadas con las posibles combinaciones. Se irán poniendo en serie las resistencias de potencia a nuestro potenciómetro y se analizarán los estados de la forma de onda en cada uno de los casos.

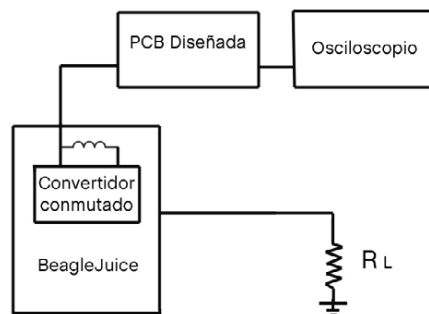


Figura 5.6.2. Esquema de la medida realizada en este apartado.

5.6.1 Primera combinación (10 – 25 Ohmios).

Poniendo en serie una resistencia de 10 Ohmios y el potenciómetro se fue girando el potenciómetro hasta que se encontró el primer punto donde la señal no era continua.

En este punto la forma de onda era la de la figura 5.6.2, la frecuencia de 25,5 kilo Herzios y el tren de pulsos que, como se observa en la figura, es mayor de 3 pulsos. Por lo tanto no nos encontramos en la misma situación que en el caso de la resistencia de 60 Ohmios donde el tren de pulsos constaba de 3 pulsos.



Figura 5.6.3. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmios + resistencia de 10 Ohmios.

A medida que se va incrementando el valor de la resistencia la corriente, a su vez, se decrementa y se visualiza en el osciloscopio que los trenes de pulsos van disminuyendo de número de pulsos y distanciándose unos de otros.

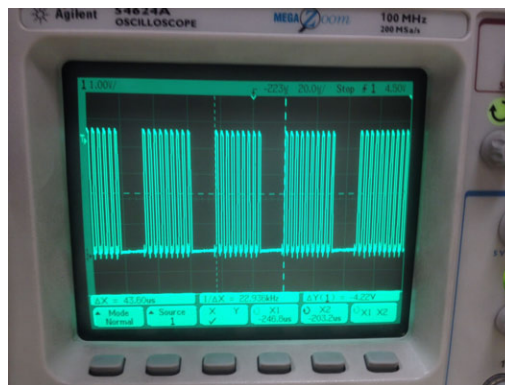


Figura 5.6.4. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmios + resistencia de 10 Ohmios.

En la última prueba que se realizó en este rango de valores se observó a la salida una forma de onda con 6 pulsos cuadrados y una frecuencia de 29,6 kilo Herzios. Se midió una resistencia de 25,8 Ohmios.

5.6.2 Segunda combinación (20 – 35 Ohmios).

Cuando se añade una segunda resistencia de 10 Ohmios en serie se ajusta el potenciómetro de manera que se pueda partir desde los 25 Ohmios que ya se analizaron en el apartado anterior.

Se incrementa el valor de la resistencia hasta que se llega al valor de 26,7 Ohmios donde se ve por primera vez un tren de pulsos compuesto de 5 pulsos cuadrados. La frecuencia medida es de 29,7 kilo Herzios.

Cuando se llega al valor de 29,4 Ohmios se visualiza por última vez el tren de 5 pulsos y la frecuencia es de 27,4 kilo Herzios.

El último valor que se estudie será el de 35,8 Ohmios donde se visualizan 4 pulsos y la frecuencia es de 27,17 kilo Ohmios. En la figura 5.6.4 se puede visualizar como son esos 4 pulsos.

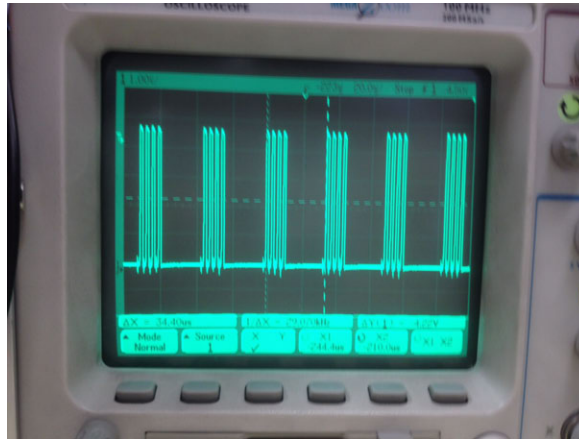


Figura 5.6.5. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmios + 2 resistencias de 10 Ohmios.

Una primera impresión de lo que se está experimentando es que a medida que vamos necesitando más corriente a la salida la frecuencia en la que se repiten los trenes de pulsos aumenta hasta que llega un punto donde deja de aumentar y lo que aumenta es el número de pulsos.

Este proceso continúa hasta que la corriente que se pide a la salida es tan grande que se obtiene a la salida una onda cuadrada continua donde lo que aumenta a la vez que aumenta la corriente es el ciclo de trabajo.

5.6.3 Tercera combinación (30 – 45 Ohmios).

En esta última combinación de la serie se añade la resistencia de 22 Ohmios y se elimina una de las resistencias de 10 Ohmios para poder continuar con las mediciones.

Como hicimos en el caso anterior ajustamos el potenciómetro de manera que se pueda continuar aumentando la resistencia desde el punto de partida, este punto es 35 Ohmios y onda con 4 pulsos cuadrados.

Se aumenta este valor hasta alcanzar los 38,7 Ohmios donde será la última vez que se obtenga una señal con 4 pulsos cuadrados a la salida. La frecuencia medida es de 25,25 kilo Herzios.

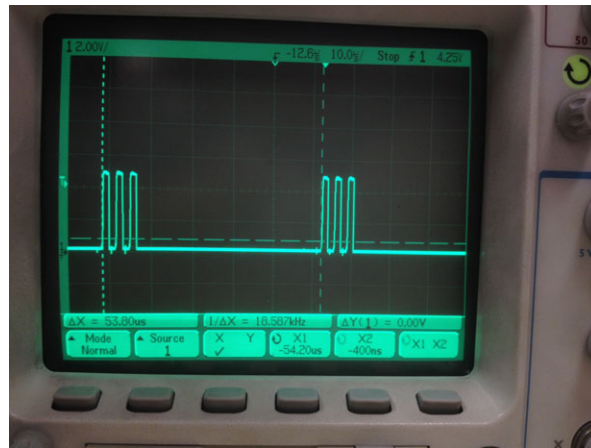


Figura 5.6.6. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmios + resistencia de 10 Ohmios + resistencia de 22 Ohmios.

Pasado ese punto se visualiza una forma de onda con tres pulsos, justo como la que vimos cuando se realizaron las pruebas del apartado 5.1 con la caja de resistencias.

Se mide un último valor de 46,4 Ohmios donde la frecuencia resultante es de 25,51 kilo Herzios.

5.6.4 Cuarta combinación (40 – 55 Ohmnios).

En esta última fase de la serie de pruebas se pondrá en serie las dos resistencias de 10 Ohmnios junto con la de 22 Ohmnios y el potenciómetro.

Durante todo este intervalo de valores la señal que se visualiza en el osciloscopio tiene 3 pulsos cuadrados como se puede observar en la figura ().

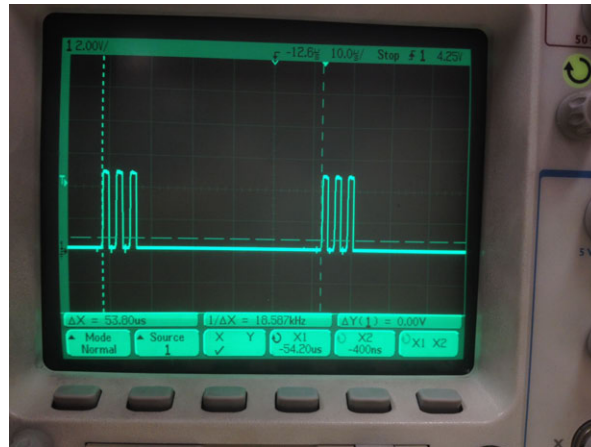


Figura 5.6.7. Señal de salida de la PCB con potenciómetro de 15 Ohmnios + 2 resistencias de 10 Ohmnios + resistencia de 22 Ohmnios.

Los rangos de valores que se midieron son de 43,7 Ohmnios a 57,3 Ohmnios donde las frecuencias fueron de 29,41 kHz a 26 kHz respectivamente.

5.7 Resultados finales.

Después de todas las pruebas que se realizaron durante todos estos apartados, se volvió a realizar otra batería de pruebas con un osciloscopio más preciso. Se cogieron como valores de corriente todas los valores de 7 a 100 Ohmnios. Por lo tanto valores de corriente desde 50 a 676 miliamperios.

Todas los coeficientes que veremos posteriormente multiplicados a la frecuencia o al ciclo de trabajo se han calculado gracias a los datos obtenidos. Como la relación es lineal se ha procedido a calcular la pendiente de la recta de regresión lineal, con ayuda del programa Excel.

En función de estos resultados se establecen varios umbrales de funcionamiento:

- Para corrientes menores de 75 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada un tren de tres pulsos cuadrados. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = f(kHz) * 0,0172$$

- Para corrientes comprendidas entre 75 y 113 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada un tren de cuatro pulsos cuadrados. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = f(kHz) * 0,0196$$

- Para corrientes comprendidas entre 113 y 146 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada un tren de cinco pulsos cuadrados. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = f(kHz) * 0,0313$$

- Para corrientes comprendidas entre 146 y 166 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada un tren de seis pulsos cuadrados. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = f(kHz) * 0,0269$$

- Para corrientes comprendidas entre 166 y 185 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada un tren de siete pulsos cuadrados. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = f(kHz) * 0,0472$$

- Para corrientes comprendidas entre 185 y 207 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada un tren de ocho pulsos cuadrados. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = f(kHz) * 0,0516$$

- Para corrientes comprendidas entre 207 y 258 miliamperios.

En este intervalo no se pudieron coger suficientes datos como para calcular las pendientes. En esta zona es cuando los pulsos van aumentando hasta convertirse en una señal continua. Corresponde con la experiencia que se describió en el apartado 5.6.1. Se necesitaría herramientas con mayor precisión para estimar la pendiente que podríamos aplicar en nuestra ecuación. En los anexos están incluidas estas medidas.

- Para corrientes comprendidas entre 258 y 676 miliamperios.

En este intervalo se observará en la salida de la PCB diseñada señal cuadrada continua. Se podrá obtener la potencia consumida con la siguiente ecuación.

$$P(W) = DutyCycle(\%) * 5,946$$

Por lo tanto se podrían usar estas ecuaciones en una aplicación que tuviera en cuenta tres variables: frecuencia, ciclo de trabajo y número de pulsos. En los trabajos futuros se planteará una posible manera para llegar a esta solución.

Capítulo 6. Conclusiones.

Finalmente, con la placa de circuito impreso que se ha diseñado y una vez se han realizado pruebas exhaustivas, es tiempo para que se haga una reflexión sobre el trabajo que se ha realizado durante estos meses.

Se partió de una idea inicial que era la relación lineal que existe entre la frecuencia de conmutación de un regulador conmutado y la corriente que entrega a su salida.

En base a esa idea se diseñó una tarjeta con la cual se puede medir la frecuencia de conmutación del regulador por medio de la tensión en la bobina de dicho circuito.

Una vez fabricada esta tarjeta se realizaron varias series de pruebas donde descubrimos que hay intervalos de corriente en los cuales la relación con la frecuencia no es lineal, aunque se descubre que en esos tramos el ciclo de trabajo está linealmente relacionado con la corriente, por lo tanto sigue siendo útil este método de medida de la potencia.

Al encontrar ocho modos de funcionamiento se aumentó la cantidad de pruebas y medidas con el fin de delimitar correctamente los umbrales de estos modos. De estos ocho modos uno relaciona directamente el ciclo de trabajo con la potencia y los otros siete la frecuencia con la potencia.

A su vez, cuando en un trabajo posterior se proponga que la BeagleBoard maneje la señal que se obtiene de la salida de la tarjeta diseñada, la programación será un poco más complicada puesto que tiene que tener en cuenta tres variables a la hora de saber que corriente se está consumiendo. Estas tres variables serían frecuencia, número de pulsos y ciclo de trabajo. En el punto posterior se analizarán varias ideas para poder obtener esos valores para las tres variables.

Aunque, a priori, esta técnica para medir la corriente parece más compleja, sin embargo, el coste de producir la tarjeta es muy pequeño y la cantidad de elementos que se necesitan para obtener esta medida serían únicamente tres: la tarjeta BeagleBoard, la batería BeagleJuice y nuestro diseño.

Por lo tanto, con el resultado de este trabajo se da pie a que la tarjeta BeagleBoard sea capaz de conocer en tiempo real la corriente que está consumiendo sin tener que utilizar tarjetas de adquisición controladas por ordenadores más potentes o similares, lo cual es una buena ventaja.

Capítulo 7. Trabajos futuros.

Después de analizar los resultados obtenidos con nuestra placa nos planteamos la problemática de cómo poder transmitir toda esta información a la BeagleBoard para así tener un sistema que tenga información en tiempo real de su consumo.

Realizamos una primera búsqueda de soluciones centrándonos en que el tiempo que necesitemos emplear para elaborarlas sea relativamente aceptable, esto es, que no conlleve más de dos o tres meses realizarlo.

Primero evaluamos el poder aplicar el trabajo realizado anteriormente por el compañero Miguel Chavarrías. Esta opción parece la más rápida puesto que utilizaríamos su trabajo. Y segundo, evaluamos la posibilidad de que en vez de añadir más hardware a nuestra tarjeta podamos utilizar la propia BeagleBoard para que maneje estos datos. En los siguientes apartados analizaremos en profundidad estas dos opciones y si son aplicables o no.

7.1 Añadir conectividad SPI.

Esta es la primera idea que se nos ocurre. Utilizar la conectividad SPI que ofrece la BeagleBoard para transmitir los datos desde nuestra placa. Eligiendo la conectividad SPI podemos aprovechar el trabajo realizado previamente por Miguel Chavarrías Lapastora en "Advanced Digital Architectures: Peripheral SPI use with OMAP3530" [12].

En este trabajo Miguel nos explica como funciona el bus SPI, cuáles son las características del McSPI del OMAP3530 y como son las características de la tarjeta ADC PccMute. Esta tarjeta fue diseñada en la EUITT para, por medio de ADCs, controlar el consumo de potencia en terminales multimedia.

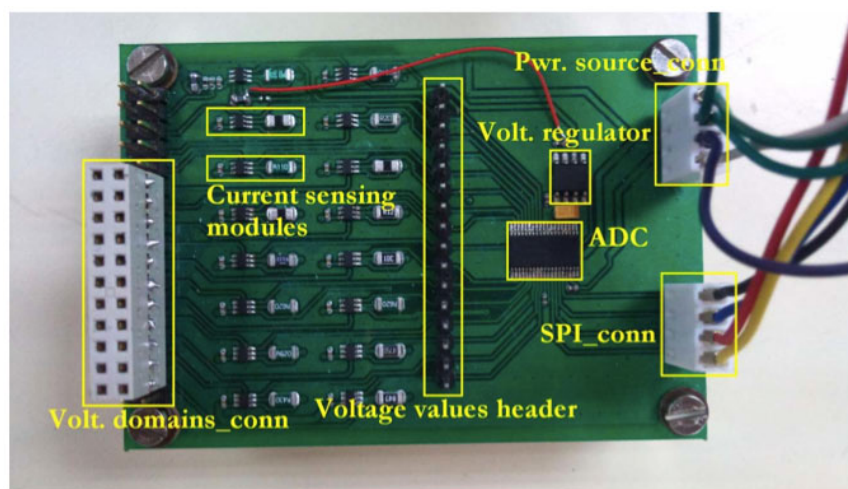


Figura 0.1. Tarjeta ADC PccMute.

Después de explicar las características de los elementos del sistema y las características de la comunicación a través del bus SPI podemos conocer como sería la implementación de un driver para poder usar esta conexión.

Miguel desarrolla un driver para poder controlar la conexión a través del SPI de la placa con la BeagleBoard. Este driver controla tanto la lectura de datos de los diferentes canales del ADC como el envío de datos para controlarlos.

Una vez conocido el interfaz usado en este trabajo y como se controla procedemos a buscar dispositivos que nos permitan añadir conectividad SPI a nuestra placa. Para realizar esa búsqueda usamos como referencia el circuito integrado que está incluido en la tarjeta que usó Miguel en su trabajo. Este integrado es el ADS7953 []. Este chip es un conversor analógico digital que además de tener esta funcionalidad añade conexión SPI. Sus principales características son:

- Frecuencia de muestreo de 1 MHz.
- Resolución de 12-bits.

- Interfaz serie con velocidad de 20 MHz.
- 16 canales.
- Modos de selección de canal automático o manual.

Descartamos usar directamente este chip ya que su encapsulado es TSSOP y las características que nos ofrece son superiores a nuestras necesidades.

Buscaremos entonces un chip más adecuado, que sea de un solo canal y el encapsulado nos sea más fácil de montar. Encontramos el ADS7818 [] cuyas características son:

- Frecuencia de muestreo de 500 kHz.
- Resolución de 12-bits.
- Un único canal.
- Encapsulado DIP.
- Interfaz serie con velocidad de 8 MHz.

A priori parece adecuarse a nuestras necesidades puesto que en los puntos en los que hemos descartado el anterior chip este nos ofrece mejores opciones. El encapsulado DIP es ideal para nuestra placa puesto que no nos va a causar problemas soldar con las herramientas más típicas y el que solo tenga un canal favorece a la sencillez de la configuración y la reducción del precio del componente.

Después de un análisis en detalle, se descarta este método puesto que la velocidad de transferencia de los datos es demasiado lenta para las necesidades de nuestro sistema.

7.2 Usar la propia BeagleBoard para manejar esos resultados obtenidos con nuestra placa.

Puesto que la opción de usar una conexión SPI para transmitir la información de la placa a la BeagleBoard vamos a valorar otras opciones.

La BeagleBoard tiene un conector de expansión, se consultará en el manual de la BeagleBoard[5] a qué interfaces está conectado.

- MMC/SD.
- McBSP.
- I2C.
- Pines de propósito general.
- McSPI.
- UART.
- GPT o PWM.

De todas estas opciones nos atrae la de los GPT (Timer de Propósito General) con la idea de poder realizar medidas de intervalos de tiempo para poder calcular la frecuencia o el ciclo de trabajo dependiendo de en que umbral de funcionamiento nos encontremos.

Para poder acceder a estos recursos necesitaremos un driver que nos permita configurarlos, leer los contadores, pararlos, en fin, todas las funcionalidades que queramos y que nos ofrezca el OMAP3530 por supuesto.

Realizamos una primera búsqueda donde encontramos el artículo “OMAP Linux - dmtimer.h - using the GP Timers on the OMAP3530 processor” [13] de Adam J. Kunen.

En este artículo se puede encontrar un análisis de los archivos fuentes del kernel de Linux para el OMAP3530 dmtimer.c y dmtimer.h que son los que se encargan de proporcionar las funciones y direcciones de registros necesarios para poder configurar los timers de propósito general del OMAP3530.

A continuación se presenta un ejemplo de driver que realiza una única función de contar tiempo y cada vez que pasan tres segundos muestra una traza en consola comunicando que ha pasado ese intervalo de tiempo.

Una vez analizado y estudiado este artículo para estimar lo que nos puede ser útil se descubre que es necesario añadir líneas a los ficheros fuentes del kernel para conseguir funciones que permitan controlar el modo captura de los timers.

Se necesita esta configuración del modo captura porque la idea que se tiene para implementar esta medida de la frecuencia o ciclo de trabajo por parte de la BeagleBoard se basa en conectar la señal de salida que genera nuestra tarjeta a

un pin del conector de expansión de la BeagleBoard. A su vez, este pin estará conectado a la señal de interrupción de uno de los timers del OMAP, previamente configurado en el multiplexador interno del procesador.

Se quiere conseguir que nuestra señal sea fuente de interrupción de un timer que esté continuamente contando de manera que cada vez que se provoque una interrupción se almacene el valor de la cuenta del timer y, cuando se produzca una nueva interrupción, se vuelva a capturar el valor de cuenta para que se vayan obteniendo incrementos de tiempo que agregados completarán el periodo de la señal.

Tras unas valoraciones de la cantidad de trabajo que puede conllevar esta implementación se definen unas acciones a llevar a cabo para conseguirlo:

- Compilar kernel de Linux para la BeagleBoard.
- Probar el driver anteriormente descrito.
- Añadir nuestros cambios del kernel. Funciones que se encontraron en un foro de gumstix.nabble.com [14].
- Desarrollar el driver que use las funciones añadidas a los ficheros del kernel.
- Desarrollar la aplicación final.

Una vez vista la cantidad de trabajo necesaria para poder realizar esta aplicación, se descarta incluirlo en este proyecto y se deja esbozado para un trabajo posterior.

Bibliografía.

[1] Russ Joseph, David Brooks, and Margaret Martonosi. "Live, Runtime Power Measurements as a Foundation for Evaluating Power/Performance Tradeoffs".

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=FD3716228676A80317182C7686C8AE3E?doi=10.1.1.78.5833&rep=rep1&type=pdf>

[2] Rong Ge, Member, IEEE, Xizhou Feng, Member, IEEE, Shuaiwen Song, Hung-Ching Chang, Student Member, IEEE, Dong Li, and Kirk W. Cameron, Member, IEEE. "PowerPack: Energy Profiling and Analysis of High-Performance Systems and Applications".

http://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=mscs_fac

[3] Rodrigo Fonseca, Prabal Dutta, Philip Levis, and Ion Stoica. "Quanto: Tracking Energy in Networked Embedded Systems".

<https://sing.stanford.edu/site/publications/osdi08fonseca.pdf>

[4] Prabal Dutta, Mark Feldmeier, Joseph Paradiso, and David Culler. "Energy Metering for Free: Augmenting Switching Regulators for Real-Time Monitoring".

<http://www.cs.berkeley.edu/~prabal/pubs/papers/dutta08icount.pdf>

[5] beagleboard.org. BeagleBoard System Reference Manual Rev C4.

http://circuitco.com/support/files/BeagleBoard-RevC4/BeagleBoard_revC4_SRM.pdf

[6] Texas Instruments. "OMAP3530 Technical Reference Manual".

[7] Liquidware. BeagleJuice Schematics.

[8] Linear Technology. "LTC1861 Datasheet".

<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1871fe.pdf>

[9] Jaime Herrera Martí. "Desarrollo de un emulador de baterías para el estudio del consumo de la tarjeta beagleboard".

[10] Agilent 66321D DC Source User's Guide.

<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5964-8184.pdf>

[11] CadSoft. "EAGLE PCB Design Software".

<http://www.cadsoftusa.com/eagle-pcb-design-software/?language=en>

[12] Miguel Chavarrías Lapastora "Advanced Digital Architectures: Peripheral SPI use with OMAP3530".

[13] Adam J. Kunen. "OMAP Linux - dmtimer.h - using the GP Timers on the OMAP 3530 processor"

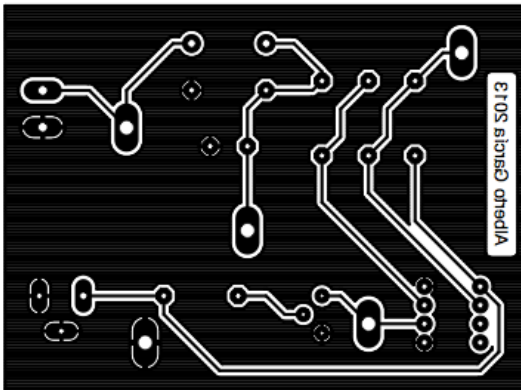
http://www.kunen.org/uC/beagle/omap_dmtimer.html

[14] Driver/kernel code for OMAP GPTimer in event capture mode.

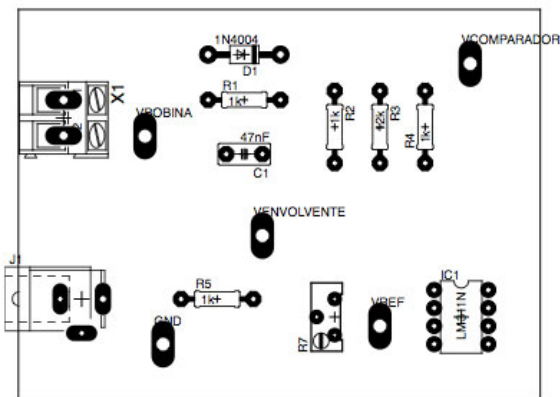
<http://gumstix.8.x6.nabble.com/Driver-kernel-code-for-OMAP-GPTimer-in-event-capture-mode-td4968032.html>

Anexos.

ANEXO A. Cara Bottom de la placa de circuito impreso.



ANEXO B. Cara Top de la placa de circuito impreso.



ANEXO C. Presupuesto.

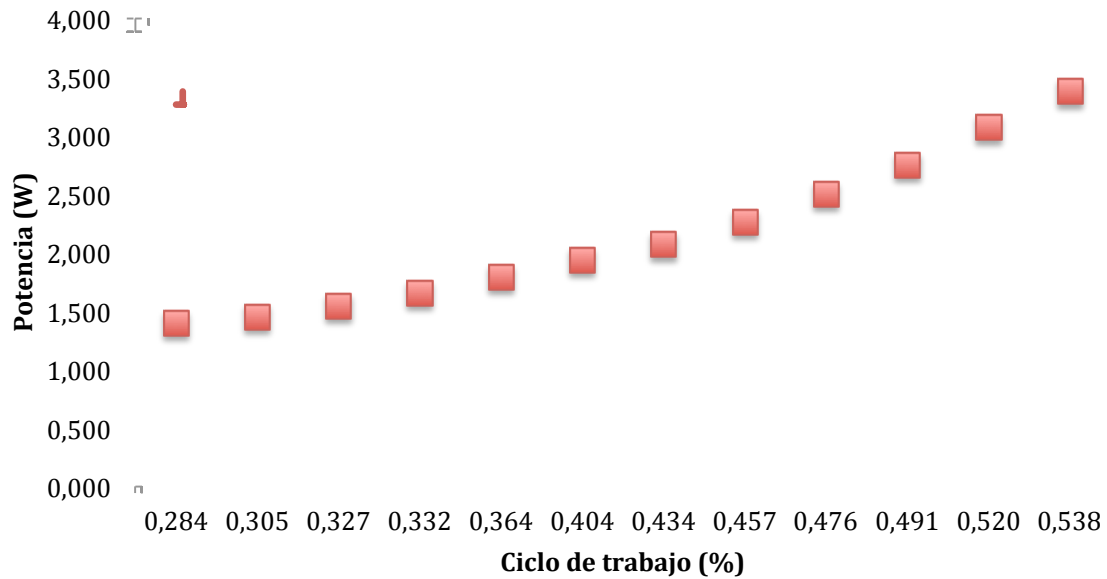
Componente	Precio(€)
LM311	0,30
Conector Jack	0,20
Conector pines	0,20
Resistencias (5)	0,05
Condensador	0,05
Puntos de test (5)	0,10
Potenciómetro	0,20
Diodo 1N4148	0,20
Placa para insolar	8
TOTAL	9,30

ANEXO D. Tablas de resultados.

Cuando la señal es continua.

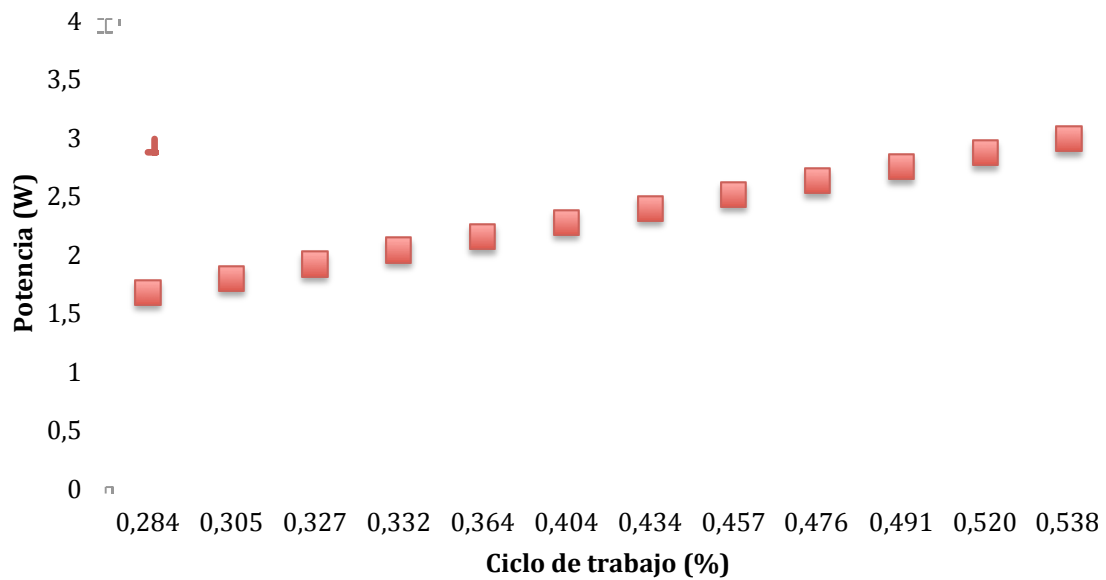
□

Gráfica con los datos obtenidos



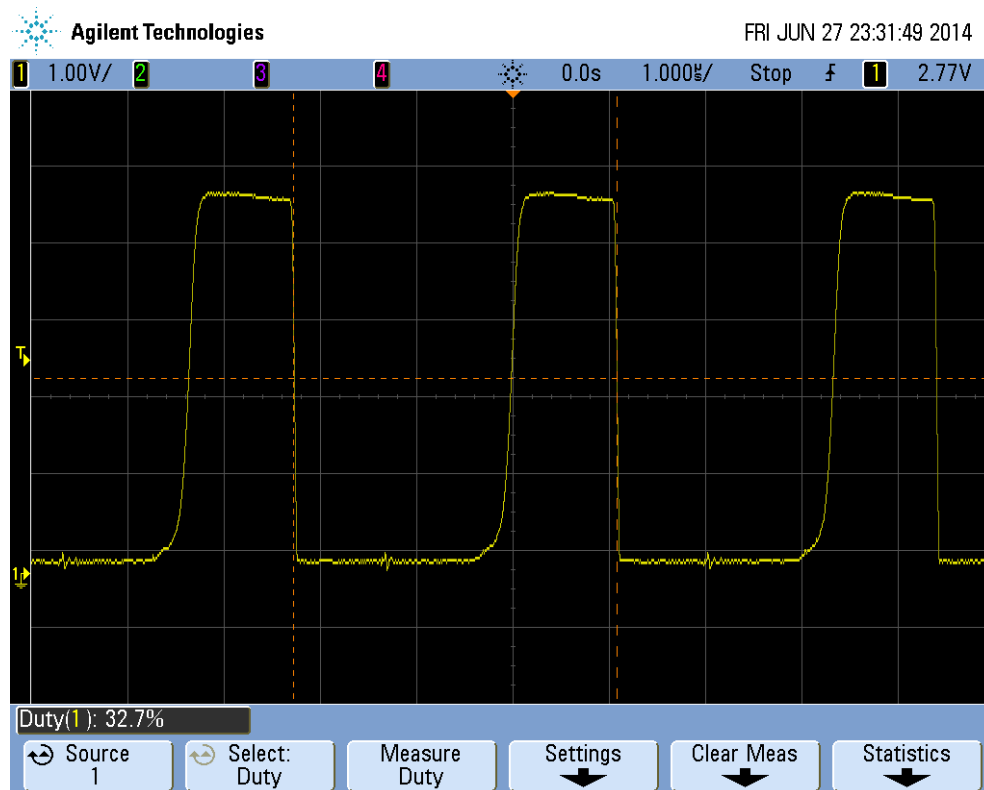
□

Gráfica hallada con la pendiente calculada



Relación entre el ciclo de trabajo y la potencia cuando la señal es continua					
Resistencia (Ohmios)	Resistencia Valor Medido (Ohmios)	Ciclo de trabajo (%)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
7	7,4	0,538	5	0,676	3,378
8	8,15	0,520	5	0,613	3,067
9	9,1	0,491	5	0,549	2,747
10	10	0,476	5	0,500	2,500
11	11,05	0,457	5	0,452	2,262
12	12,08	0,434	5	0,414	2,070
13	12,9	0,404	5	0,388	1,938
14	13,96	0,364	5	0,358	1,791
15	15,1	0,332	5	0,331	1,656
16	16,2	0,327	5	0,309	1,543
17	17,2	0,305	5	0,291	1,453
18	17,9	0,284	5	0,279	1,397

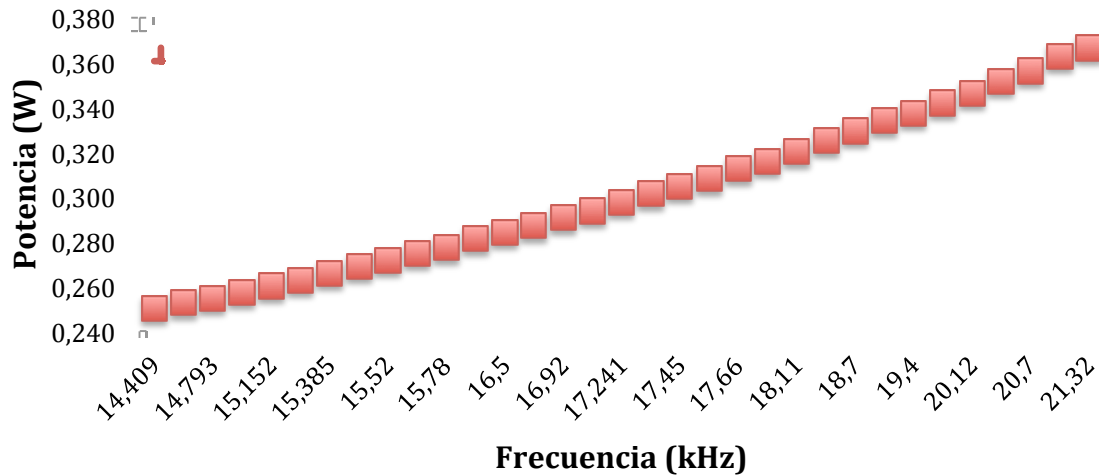
Señal capturada en el osciloscopio durante estas pruebas.



Cuando la señal tiene 3 pulsos.

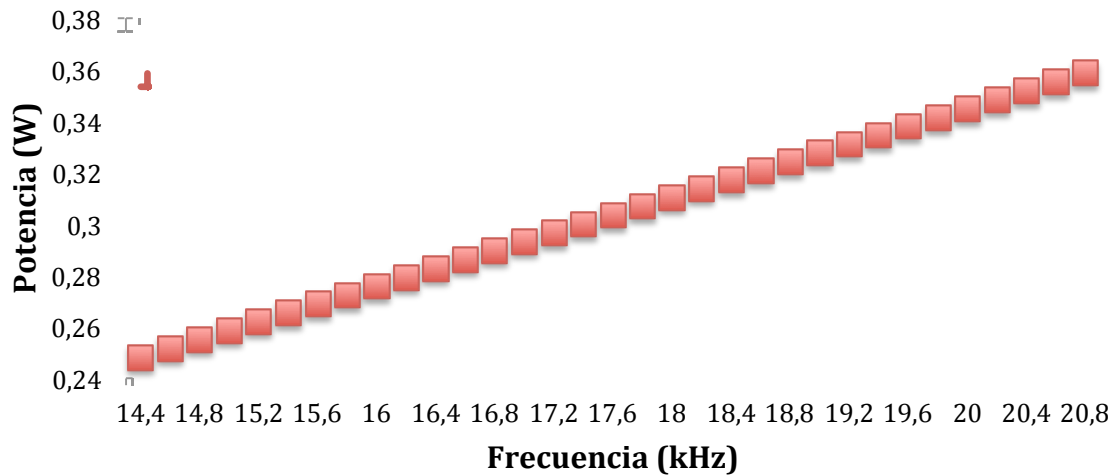
□

Gráfica obtenida con las medidas cuando la señal tiene 3 pulsos.

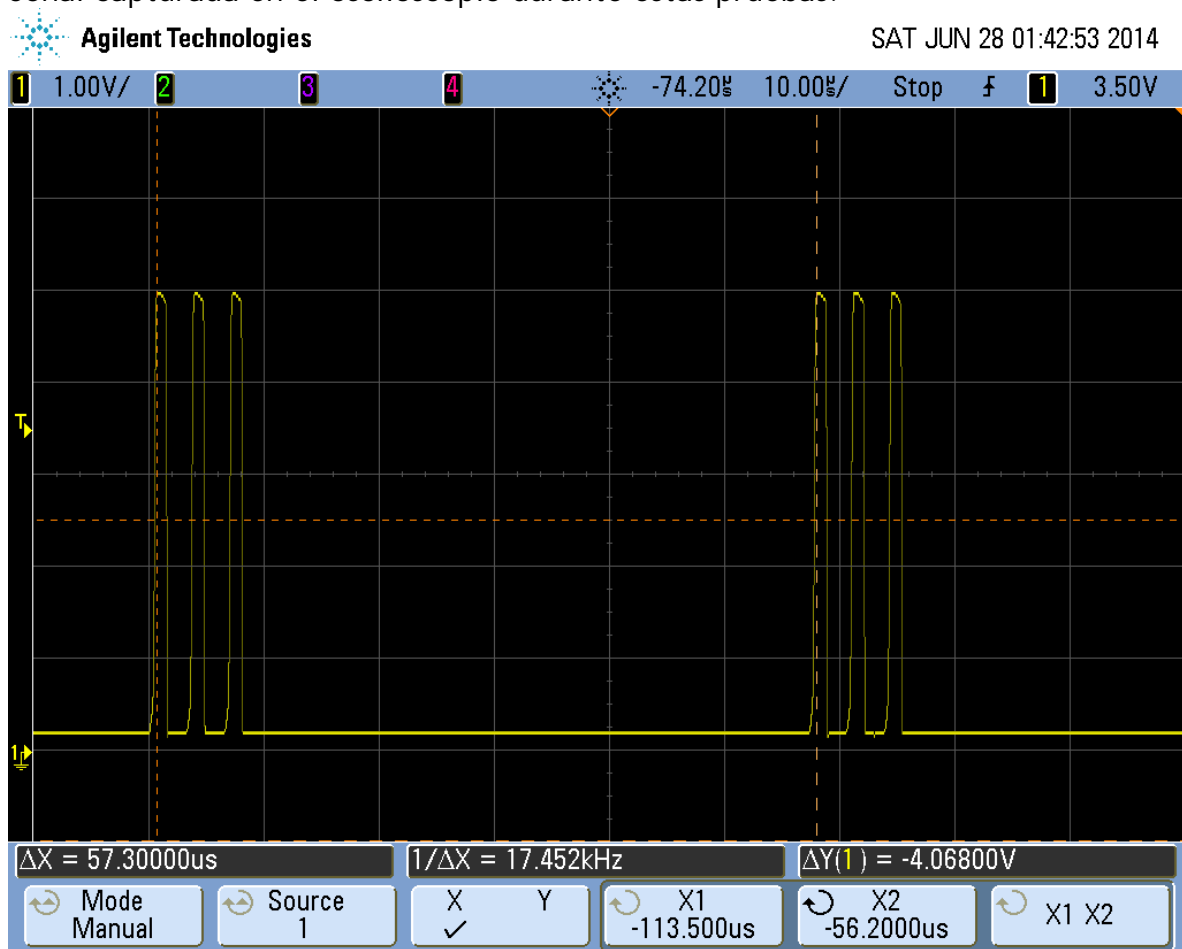


□

Gráfica hallada con la pendiente calculada cuando la señal tiene 3 pulsos.



Señal capturada en el osciloscopio durante estas pruebas.

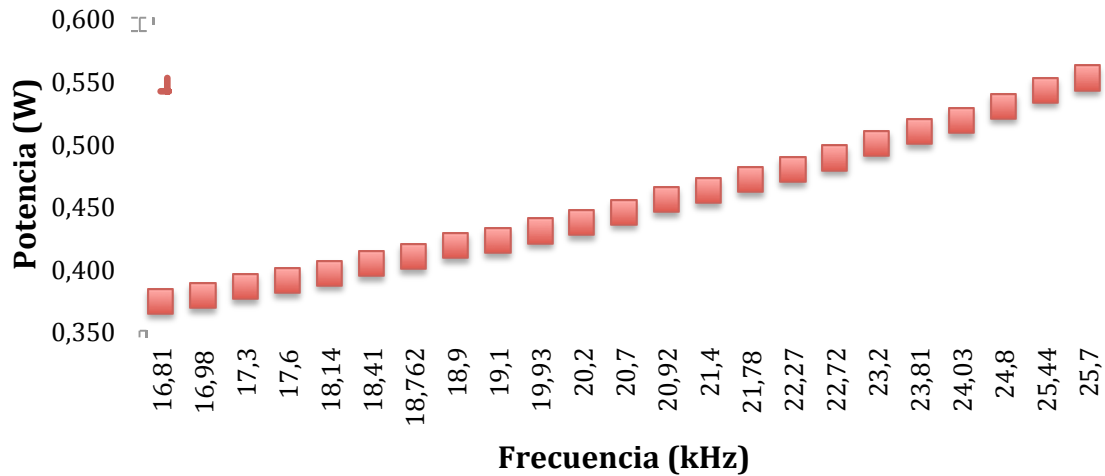


Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos						
Resistencia (Ohmnios)	Resistencia Valor Medido (Ohmnios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
100	99,9	14,409	5	0,050	0,250	3
99	98,9	14,663	5	0,051	0,253	3
98	98,1	14,793	5	0,051	0,255	3
97	97,1	14,948	5	0,051	0,257	3
96	96,1	15,152	5	0,052	0,260	3
95	95,1	15,244	5	0,053	0,263	3
94	94	15,385	5	0,053	0,266	3
93	92,9	15,43	5	0,054	0,269	3
92	92	15,52	5	0,054	0,272	3
91	91	15,6	5	0,055	0,275	3
90	90,1	15,78	5	0,055	0,277	3
89	88,9	16,42	5	0,056	0,281	3
88	88	16,5	5	0,057	0,284	3
87	87,1	16,6	5	0,057	0,287	3
86	86	16,92	5	0,058	0,291	3
85	85,1	17,123	5	0,059	0,294	3
84	84	17,241	5	0,060	0,298	3
83	82,99	17,331	5	0,060	0,301	3
82	82	17,45	5	0,061	0,305	3
81	81,09	17,51	5	0,062	0,308	3
80	79,99	17,66	5	0,063	0,313	3
79	79,1	17,88	5	0,063	0,316	3
78	78,1	18,11	5	0,064	0,320	3
77	76,9	18,28	5	0,065	0,325	3
76	75,9	18,7	5	0,066	0,329	3
75	74,86	18,9	5	0,067	0,334	3
74	74,09	19,4	5	0,067	0,337	3
73	73,1	19,8	5	0,068	0,342	3
72	72,2	20,12	5	0,069	0,346	3
71	71,1	20,5	5	0,070	0,352	3
70	70,2	20,7	5	0,071	0,356	3
69	68,89	21,142	5	0,073	0,363	3
68	68,2	21,32	5	0,073	0,367	3

Cuando la señal tiene 4 pulsos.

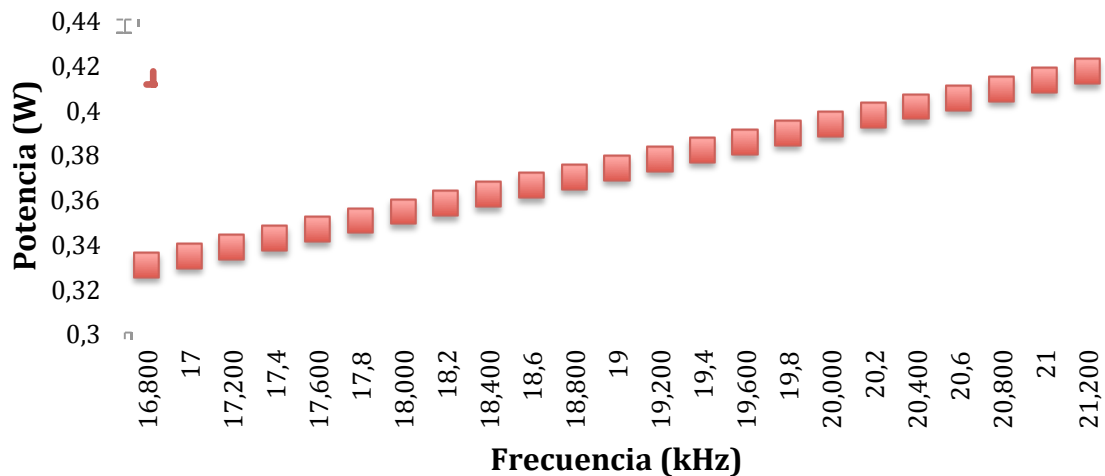
□

Gráfica obtenidas con las medidas cuando la señal tiene 4 pulsos.

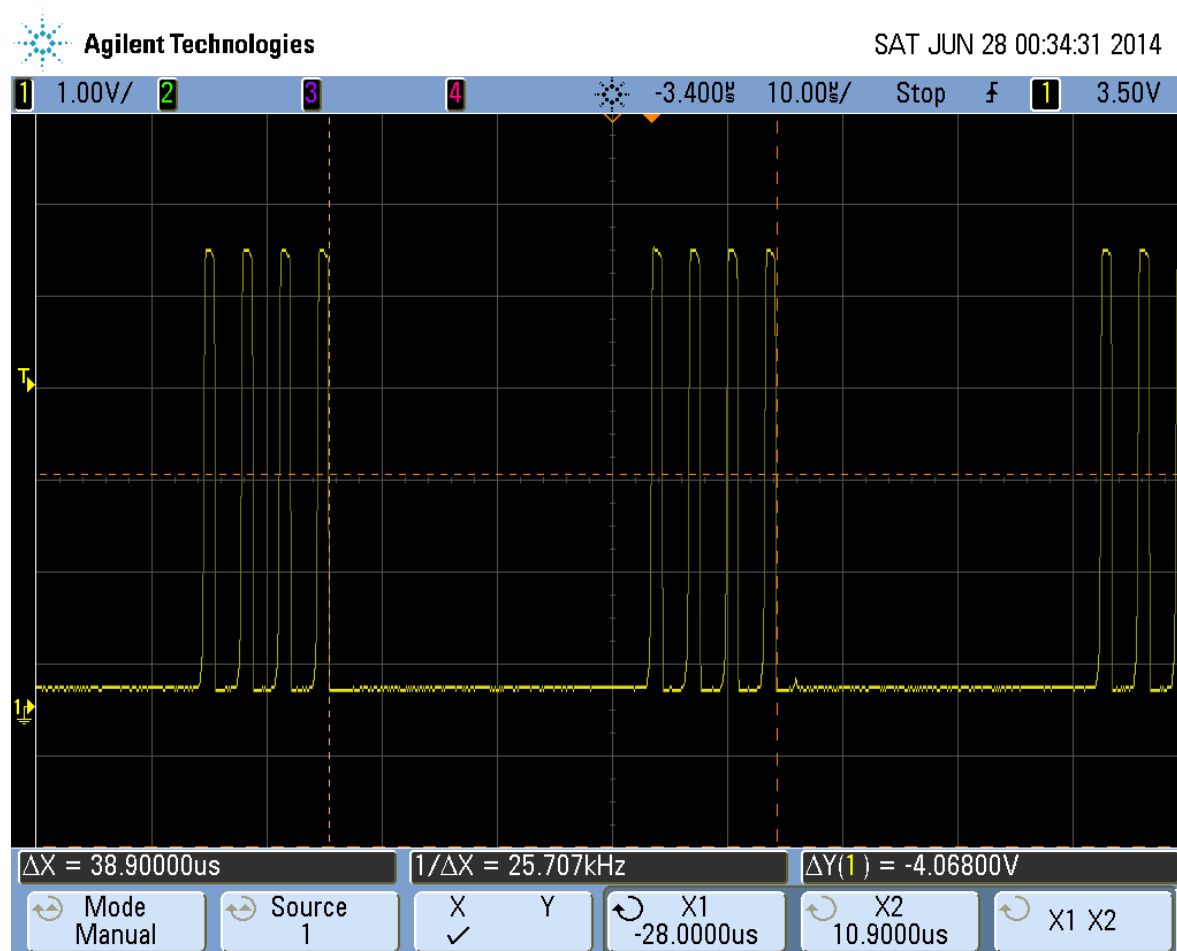


□

Gráfica hallada con la pendiente calculada cuando la señal tiene 4 pulsos.



Señal capturada en el osciloscopio durante estas pruebas.

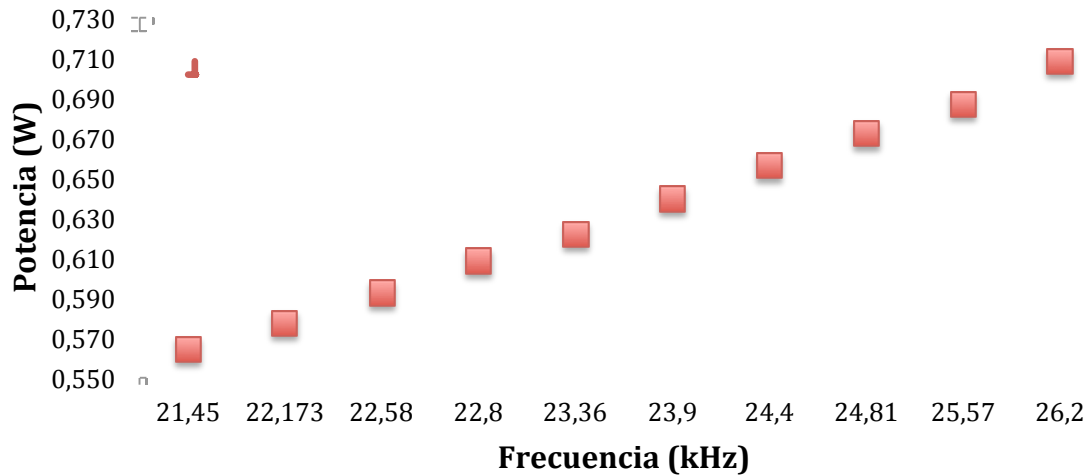


Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos						
Resistencia (Ohmnios)	Resistencia Valor Medido (Ohmnios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
67	66,9	16,81	5	0,075	0,374	4
66	66,1	16,98	5	0,076	0,378	4
65	64,9	17,3	5	0,077	0,385	4
64	64,1	17,6	5	0,078	0,390	4
63	63,1	18,14	5	0,079	0,396	4
62	61,9	18,41	5	0,081	0,404	4
61	61,1	18,762	5	0,082	0,409	4
60	59,8	18,9	5	0,084	0,418	4
59	59,2	19,1	5	0,084	0,422	4
58	58,2	19,93	5	0,086	0,430	4
57	57,3	20,2	5	0,087	0,436	4
56	56,2	20,7	5	0,089	0,445	4
55	54,99	20,92	5	0,091	0,455	4
54	54,1	21,4	5	0,092	0,462	4
53	53,1	21,78	5	0,094	0,471	4
52	52,2	22,27	5	0,096	0,479	4
51	51,2	22,72	5	0,098	0,488	4
50	50,03	23,2	5	0,100	0,500	4
49	49,1	23,81	5	0,102	0,509	4
48	48,3	24,03	5	0,104	0,518	4
47	47,2	24,8	5	0,106	0,530	4
46	46,1	25,44	5	0,108	0,542	4
45	45,3	25,7	5	0,110	0,552	4
44	44,3	21,45	5	0,113	0,564	5
43	43,3	22,173	5	0,115	0,577	5
42	42,2	22,58	5	0,118	0,592	5
41	41,1	22,8	5	0,122	0,608	5
40	40,2	23,36	5	0,124	0,622	5
39	39,1	23,9	5	0,128	0,639	5
38	38,1	24,4	5	0,131	0,656	5
37	37,2	24,81	5	0,134	0,672	5
36	36,4	25,57	5	0,137	0,687	5
35	35,3	26,2	5	0,142	0,708	5

Cuando la señal tiene 5 pulsos.

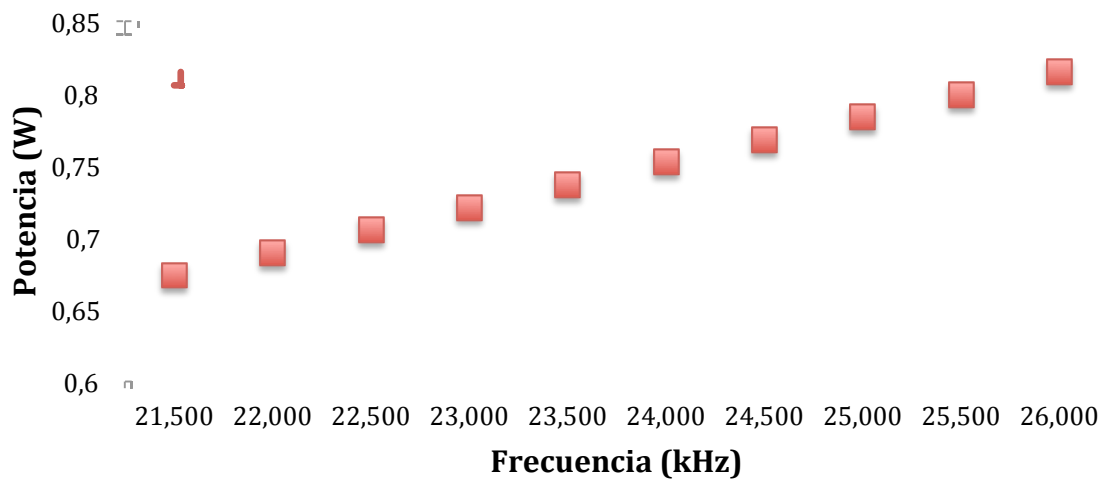
□

Gráfica obtenida con las medidas cuando la señal tiene 5 pulsos.

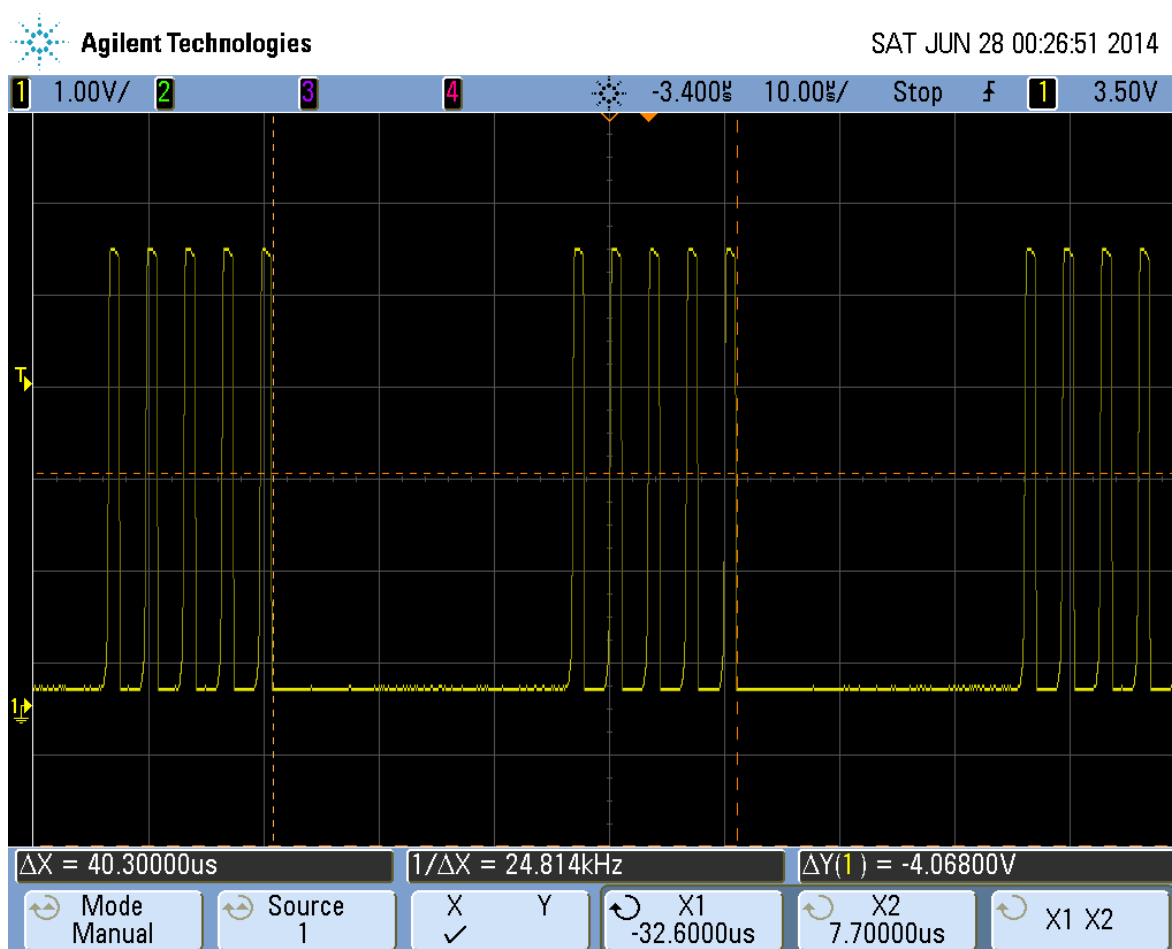


□

Gráfica hallada con la pendiente calculada cuando la señal tiene 5 pulsos.



Señal capturada en el osciloscopio durante las pruebas.



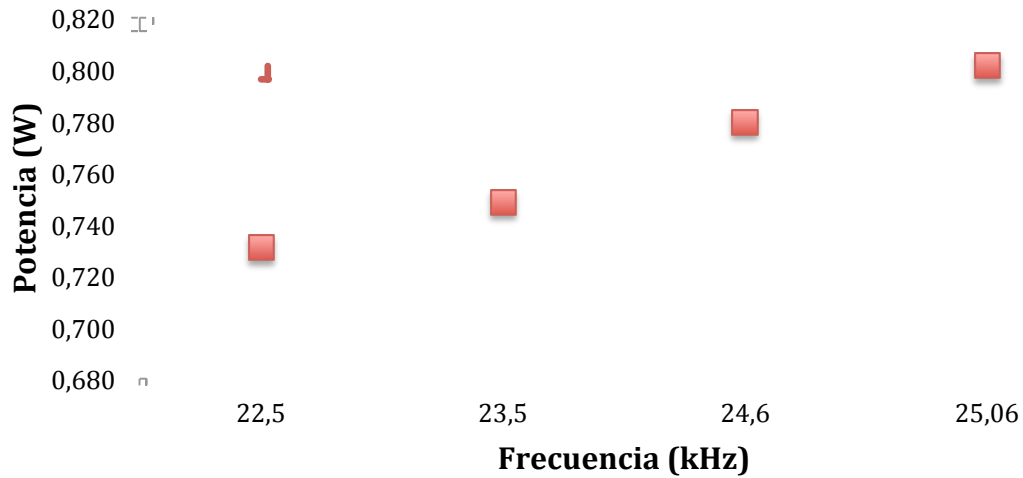
Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos

Resistencia (Ohmios)	Resistencia Valor Medido (Ohmios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
44	44,3	21,45	5	0,113	0,564	5
43	43,3	22,173	5	0,115	0,577	5
42	42,2	22,58	5	0,118	0,592	5
41	41,1	22,8	5	0,122	0,608	5
40	40,2	23,36	5	0,124	0,622	5
39	39,1	23,9	5	0,128	0,639	5
38	38,1	24,4	5	0,131	0,656	5
37	37,2	24,81	5	0,134	0,672	5
36	36,4	25,57	5	0,137	0,687	5
35	35,3	26,2	5	0,142	0,708	5

Cuando la señal tiene 6 pulsos.

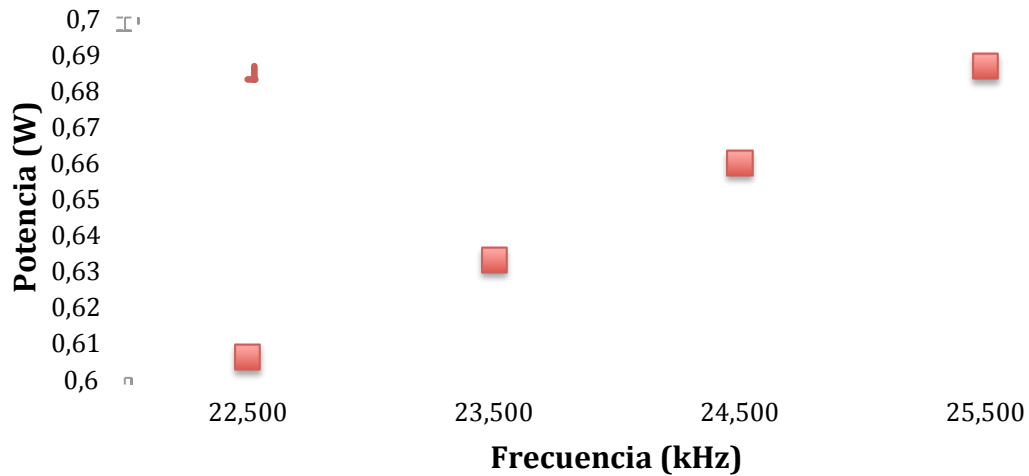
□

Gráfica obtenida con las medidas cuando la señal tiene 6 pulsos

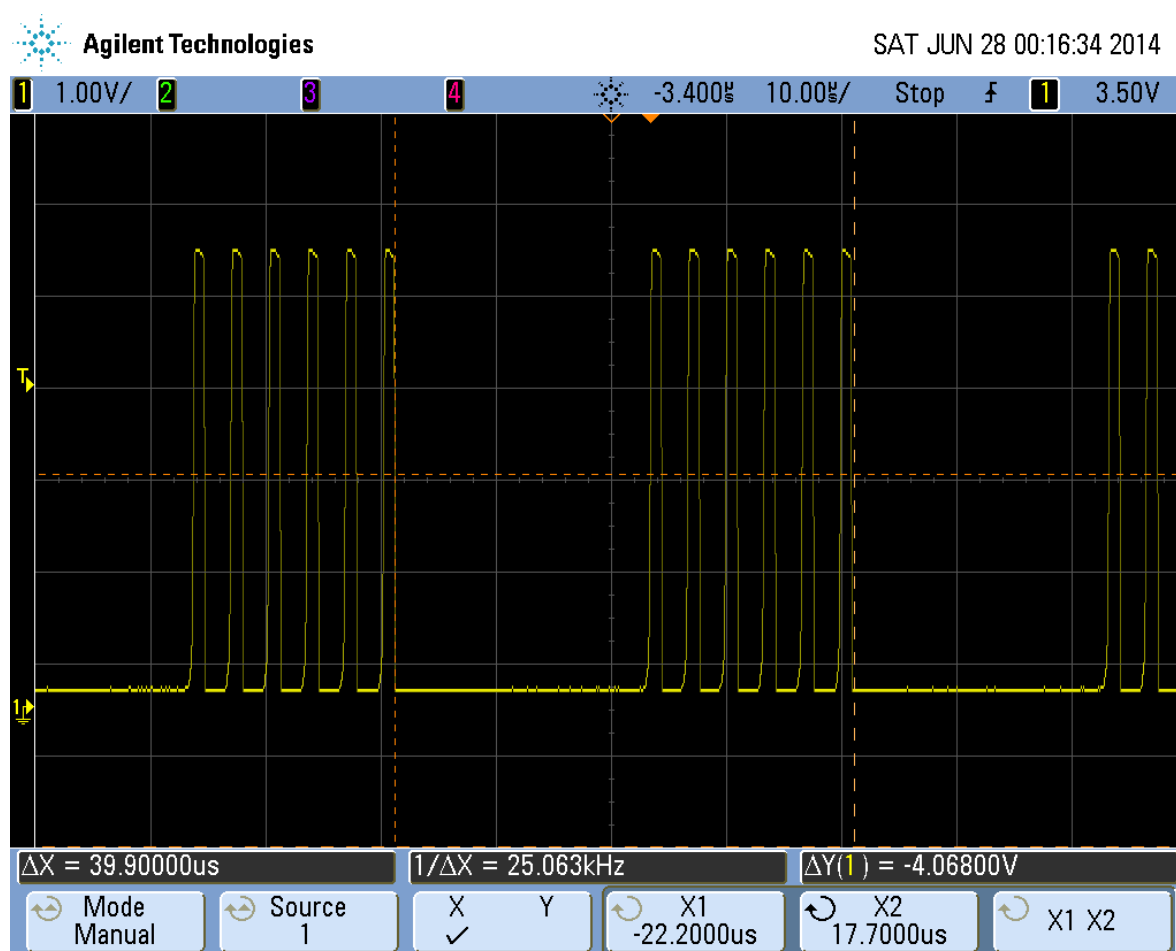


□

Gráfica hallada con la pendiente calculada cuando la señal tiene 6 pulsos.



Señal capturada en el osciloscopio durante las pruebas.



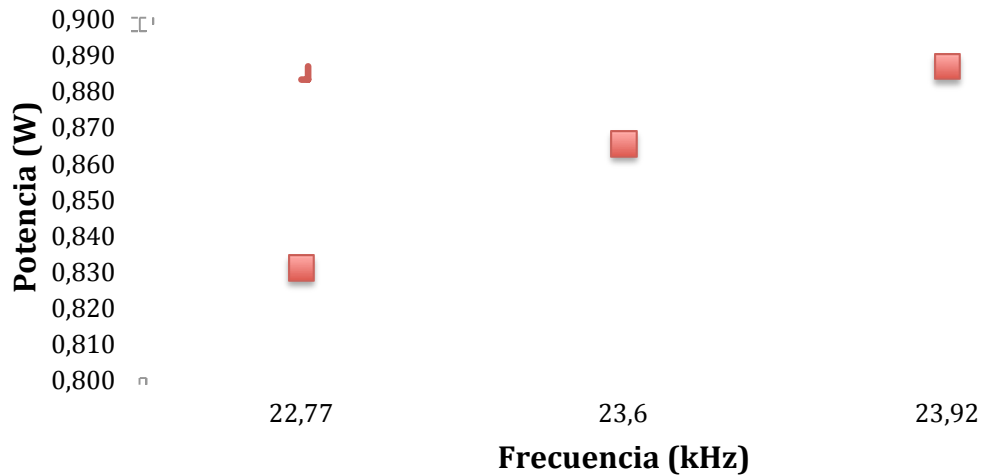
Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos

Resistencia (Ohmios)	Resistencia Valor Medido (Ohmios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
34	34,2	22,5	5	0,146	0,731	6
33	33,4	23,5	5	0,150	0,749	6
32	32,07	24,6	5	0,156	0,780	6
31	31,2	25,06	5	0,160	0,801	6

Cuando la señal tiene 7 pulsos.

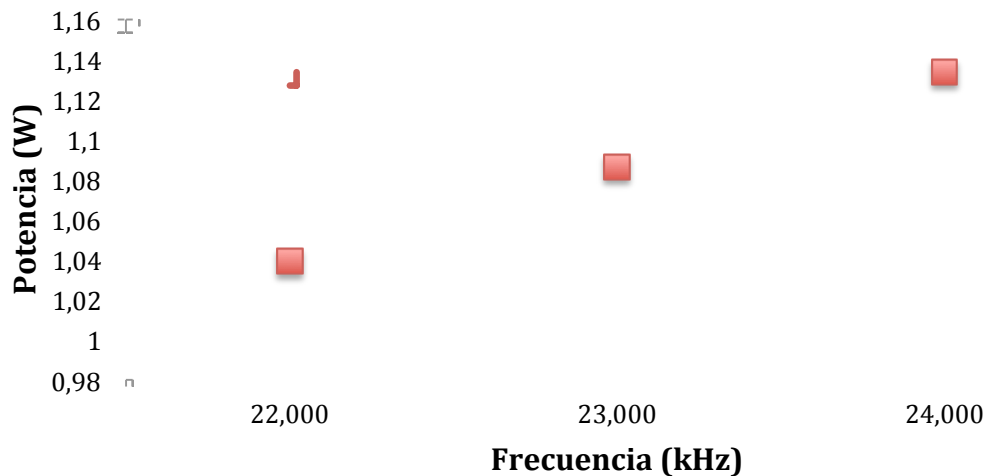
□

Relación de la frecuencia y la potencia cuando la señal tiene 7 pulsos.

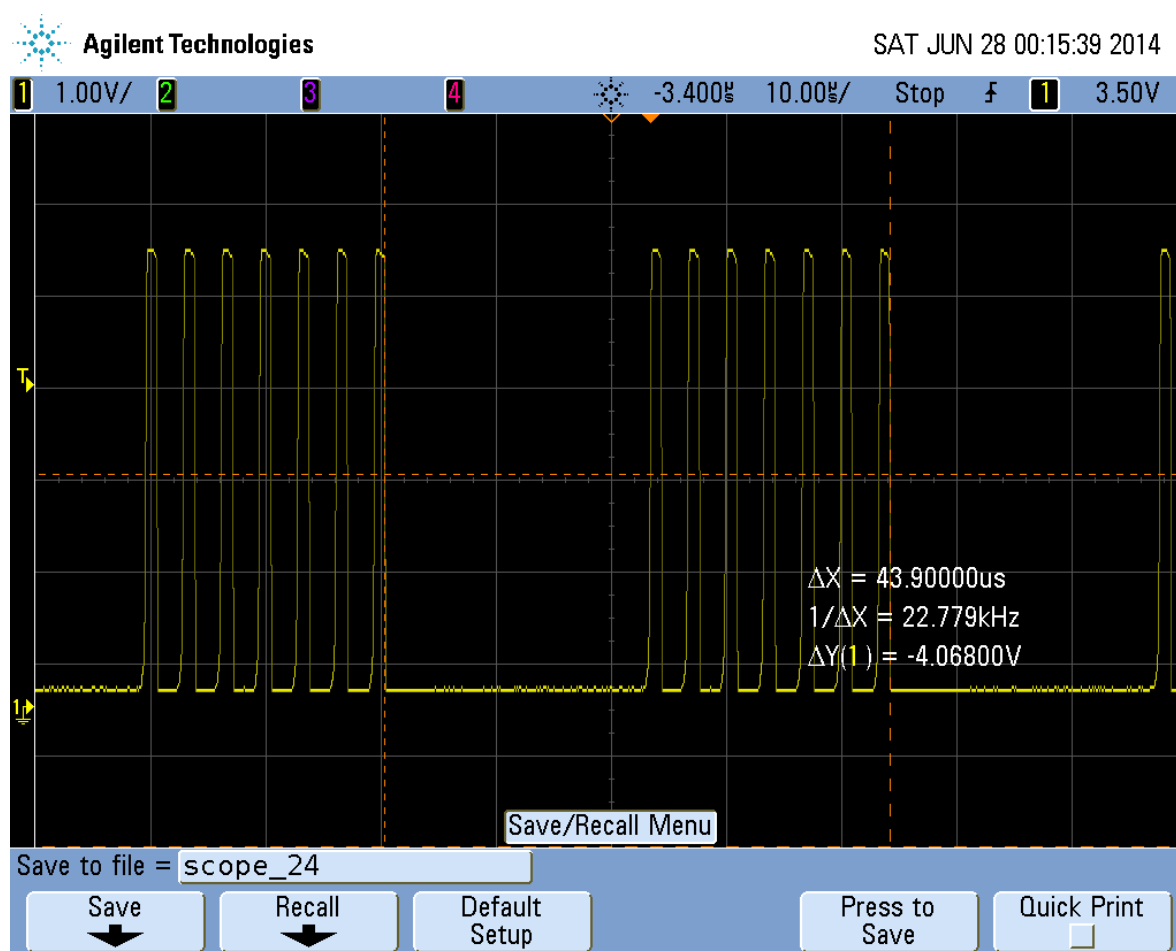


□

Gráfica hallada con la pendiente calculada cuando la señal tiene 7 pulsos.



Señal capturada en el osciloscopio durante las pruebas.



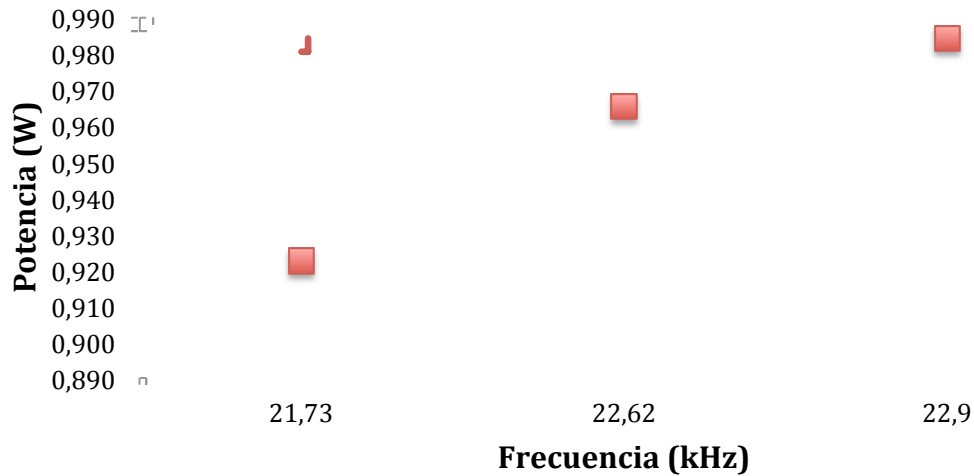
Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos

Resistencia (Ohmnios)	Resistencia Valor Medido (Ohmnios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
30	30,1	22,77	5	0,166	0,831	7
29	28,9	23,6	5	0,173	0,865	7
28	28,2	23,92	5	0,177	0,887	7

Cuando la señal tiene 8 pulsos.

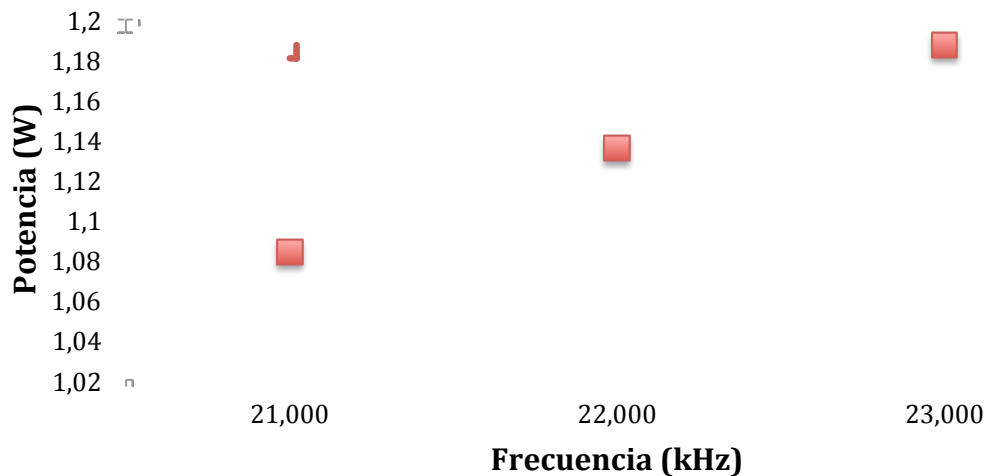
□

Relación de la frecuencia y la potencia cuando la señal tiene 8 pulsos.

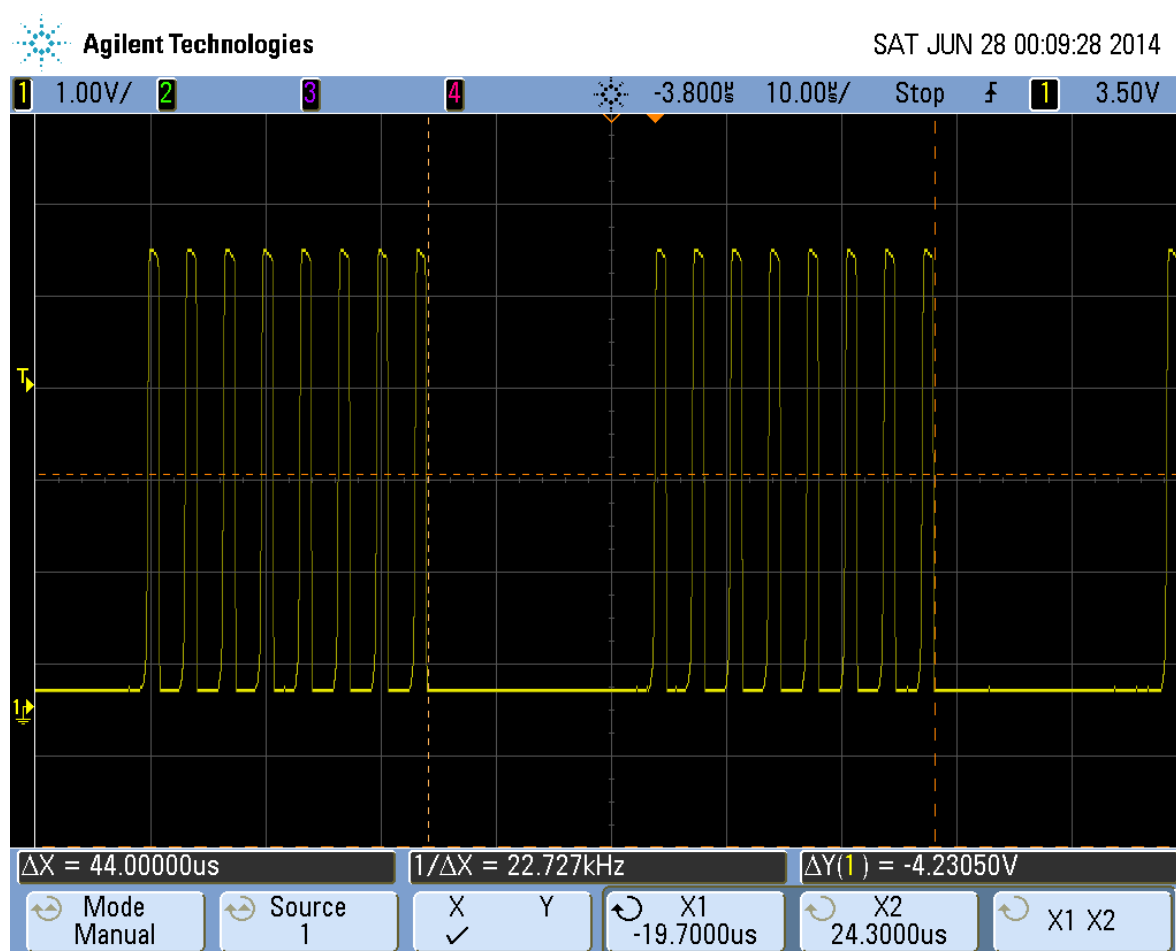


□

Gráfica hallada con la pendiente calculada cuando la señal tiene 8 pulsos.



Señal capturada en el osciloscopio durante las pruebas.



Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos

Resistencia (Ohmios)	Resistencia Valor Medido (Ohmios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
27	27,1	21,73	5	0,185	0,923	8
26	25,9	22,62	5	0,193	0,965	8
25	25,4	22,9	5	0,197	0,984	8

Datos obtenidos en el modo en el que no pudimos sacar gráfica de la pendiente.

Relación entre la frecuencia y la potencia cuando la señal en función del número de pulsos						
Resistencia (Ohmnios)	Resistencia Valor Medido (Ohmnios)	Frecuencia (kHz)	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Numero de pulsos
24	24,2	21,64	5	0,207	1,033	9
23	23,2	20,32	5	0,216	1,078	10
22	22,3	19,3	5	0,224	1,121	11
21	20,9	18,5	5	0,239	1,196	12
20	20,3	16,5	5	0,246	1,232	16
19	19,4	10,04	5	0,258	1,289	26

